

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ VENKOVNÍHO PROVEDENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

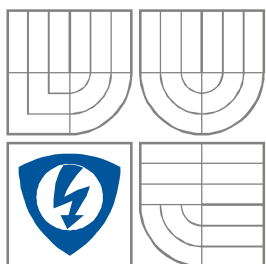
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Petr Velešík

BRNO 2008



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# **PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ VENKOVNÍHO PROVEDENÍ**

INSTRUMENT VOLTAGE TRANSFORMERS OF OUTDOOR TYPE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Ing. PETR VELEŠÍK

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR VANĚK, CSc.

BRNO 2008

***ORIGINÁL ZADÁNÍ PRÁCE***





## **Abstrakt**

Stěžejní částí diplomové práce je provedení rozboru funkce přístrojového transformátoru napětí s pomocí náhradního schématu a fázorových diagramů. U prvků náhradního schématu je řešen jejich vliv na chyby přístrojového transformátoru napětí a dále je pojednáno o magnetických materiálech používaných pro magnetické obvody přístrojových transformátorů napětí. Práce je doplněna o obrázky znázorňující uspořádání vinutí a magnetického obvodu v 3D modelu.

## **Abstract**

The function analysis of instrument voltage transformer with the aid of his equivalent diagram and his phasor diagrams is main part of my masters thesis. I solve the influence and errors of his equivalent diagram's elements on this instrument voltage transformer. Than I talk about suitable magnetic materials using for instrument voltage transformers. There are 3D pictures which show lay-out of instrument voltage transformers's windings and his magnetic circuit.

## **Klíčová slova**

fázorový diagram, magnetické jádro, měřicí transformátor, napěťový transformátor, náhradní schéma, primární vinutí, přístrojový transformátor, sekundární vinutí, venkovní transformátor

## **Keywords**

phasor diagram, magnetic core, measurement transformer, voltage transformer, substitution diagram, primary winding, instrument transformer, secondary winding, outdoor transformer

## **Bibliografická citace**

VELEŠÍK, P. *Přístrojový transformátor napětí venkovního provedení*. . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaromír Vaněk, CSc.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Přístrojový transformátor napětí venkovního provedení jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne : 30. 5. 2008

Podpis:.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. JAROMÍRU VAŇKOVÍ, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 30. 5. 2008

Podpis autora: .....



## OBSAH

ÚVOD .....	12
1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY .....	13
1.1 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	14
1.2 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NAPĚTÍ .....	15
2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH VELIČIN .....	16
3 ROZBOR FUNKCE PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	19
3.1 CHARAKTERISTIKA FUNKCE .....	19
3.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA .....	19
3.3 FÁZOROVÝ DIAGRAM .....	20
3.4 CHYBY TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ A DIAGRAMY CHYB .....	23
3.5 KOMPLEXNÍ DIAGRAM CHYB A POLE DOVOLENÝCH CHYB .....	24
4 PRVKY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU A JEJICH VLIV NA CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	27
4.1 NAPĚŤOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPRAZDNO .....	27
4.2 VLIV BŘEMENE NA CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	28
4.3 VLIV NAPĚTÍ NA CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	30
4.4 VLIV SEKUNDÁRNÍHO ÚČINÍKU NA CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	31
4.5 VLIV KMITOČTU NA CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	31
5 VÝPOČET CHYB .....	32
5.1 VÝPOČET CHYB A JEJICH SLOŽEK .....	32
5.2 ÚPRAVA CHYB – ZÁVITOVÁ KOREKCE .....	33
5.3 VÝPOČET PRŮCHOZÍ IMPEDANCE A JEJICH SLOŽEK Z KOMPLEXNÍHO DIAGRAMU CHYB .....	36
5.4 ROZPĚTÍ CHYB .....	39
6 MAGNETICKÉ MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NAPĚTÍ .....	40
6.1 MAGNETICKÉ MATERIÁLY .....	40
6.2 ZPRACOVÁNÍ PLECHŮ A PÁSŮ .....	40
6.3 TEXTURA PÁSŮ KŘEMÍKOVÝCH OCELÍ .....	40
6.3.1 GOSSOVA TEXTURA .....	41
6.3.2 KUBICKÁ TEXTURA .....	41
6.4 JÁDRA MAGNETICKÝCH OBVODŮ .....	42
7 TEORETICKÝ POSTUP VÝPOČTU TRANSFORMÁTORU .....	44
7.1 NÁVRH PRŮŘEZU JÁDRA .....	44
7.2 NÁVRH PRŮŘEZU POUZDRA SEKUNDÁRNÍHO VINUTÍ .....	44
7.3 NÁVRH POČTU ZÁVITŮ PRIMÁRNÍHO A SEKUNDÁRNÍHO VINUTÍ .....	46
7.4 NÁVRH ODPORU PRIMÁRNÍHO A SEKUNDÁRNÍHO VINUTÍ .....	47
7.5 NÁVRH SEKUNDÁRNÍHO VINUTÍ .....	48



7.6 NÁVRH PRIMÁRNÍHO VINUTÍ .....	48
7.7 VLASTNÍ NÁVRH SEKUNDÁRNÍHO A PRIMÁRNÍHO VINUTÍ.....	49
7.8 VÝPOČET ODPORŮ VINUTÍ.....	50
7.9 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE .....	51
7.10 VÝPOČET PROUDU NAPRÁZDNO A JEHO SLOŽEK .....	52
8 VÝPOČET A NÁVRH ZADANÉHO TRANSFORMÁTORU.....	54
9 STRUČNÝ POPIS VÝROBY TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	63
9.1 MAGNETICKÉ JÁDRO .....	63
9.2 SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ.....	63
9.3 PRIMÁRNÍ VINUTÍ.....	63
9.4 PŘEDZKOUŠKA A KOREKCE.....	64
9.5 MODEL Y A FORMY .....	64
9.6 ODLÉVÁNÍ EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC .....	64
10 ZNÁZORNĚNÍ VINUTÍ A MAGNETICKÉHO OBVODU V 3D MODULU .....	66
ZÁVĚR.....	71
POUŽITÁ LITERATURA .....	72
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	76
SEZNAM TABULEK .....	78
SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK SI.....	79
SEZNAM POUŽITÝCH ODVOZENÝCH JEDNOTEK SI.....	79
PŘÍLOHA A1 : MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA A ZTRÁTY V ŽELEZE	
PŘÍLOHA B1.1 : TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ NA 12 kV - ŘEZY	
PŘÍLOHA B1.2 : TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ NA 12 kV - POHLEDY	
PŘÍLOHA B2 : MAGNETICKÉ JÁDRO	
PŘÍLOHA B3 : STAHOVACÍ PÁSEK MAGNETICKÉHO JÁDRA	



## ÚVOD

Účelem diplomové práce přístrojový transformátor napětí venkovního provedení je:

- a) Popis prvků náhradního schématu transformátoru a jejich vliv na chyby přístrojového transformátoru napětí.
- b) Charakteristika magnetických materiálů pro magnetické obvody přístrojových transformátorů napětí.
- c) Vypracování konstrukčního návrhu venkovního přístrojového transformátoru napětí 12000/100 V, 50 (30) VA, třída přesnosti 0,5.
- d) Znázornění vinutí a magnetického obvodu v 3D modulu a návrh funkčního modelu transformátoru.

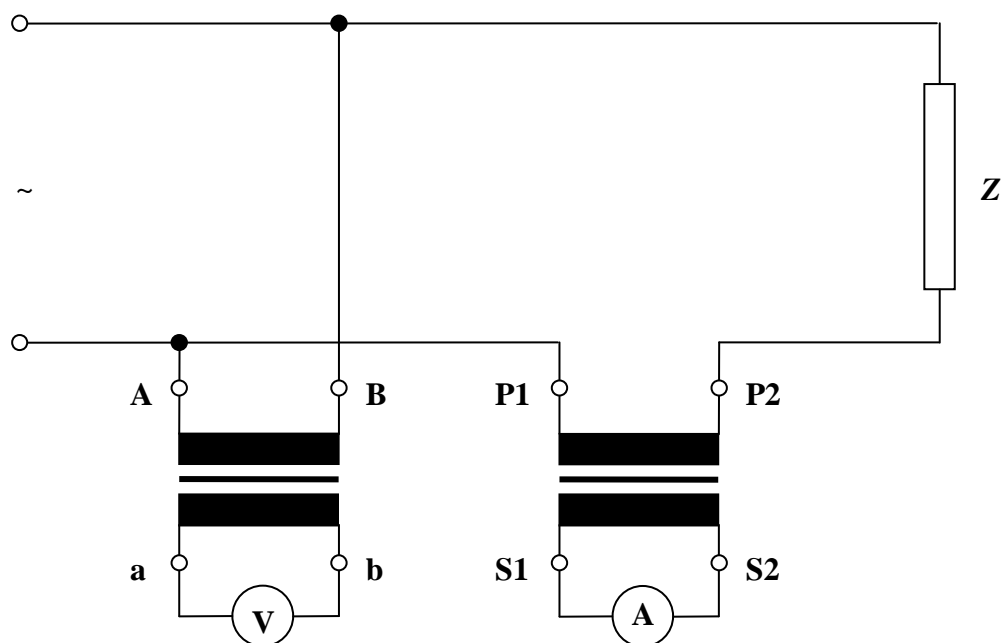
V diplomové práci je uvažován napěťový transformátor VN 12 kV pro měření sdruženého napětí, tedy dvoupólově izolovaný transformátor s jmenovitým kmitočtem 50 Hz sloužící k transformaci napětí na straně vn na normalizovanou hodnotu napětí na straně nn 100 V a k oddělení vn sítě od měřicích obvodů. Zadán je transformační převod 12000/100 V. Výkon na sekundární straně se předpokládá 30 VA, třída přesnosti  $T_p$  0,5. Jako magnetický obvod se předpokládá použití Q jádra navinutého z ocelových pásků za studena válcovaných (orientovaných). Dále se u transformátoru uvažuje jeho venkovní používání, bude namáhán povětrnostními podmínkami a proto je zapotřebí zvážit vhodné rozměry izolací a délku povrchové cesty.



## 1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Přístrojové transformátory jsou elektromagnetické stroje netočivé, které napájejí přístrojové obvody. Jejich konstrukce a technologie mají některé společné znaky s ostatními elektromagnetickými stroji netočivými (např. s výkonovými transformátory, ale podle požadavků na funkci se od nich v různých věcech liší), jejich funkční vlastnosti se však více blíží přístrojům.

V podstatě můžeme říci, že přístrojové transformátory transformují hodnoty proudu a napětí měřených obvodů na standardní hodnoty vhodné pro napájení proudových a napěťových cívek měřicích nebo jisticích přístrojů. Dále oddělují obvod vn od obvodu nn (např. obvod měřicích přístrojů) a vzdalují měřicí a jisticí přístroje z dosahu působení silných magnetických a elektrických polí proudových obvodů a vylučují tak jejich nepříznivé působení na správnou funkci těchto přístrojů. Umožňují také pro účely jistění snadno stanovit součty nebo rozdíly proudů nebo napětí v několika navzájem izolovaných obvodech. Použití přístrojových transformátorů nám také dává možnost soustředit měřicí a jisticí přístroje v dozornách a velínech mimo rozvodny a usnadnit tak řízení a ovládání rozvodny a celé sítě.



Obr. 1-1 Zapojení přístrojových transformátorů do měřených obvodů – [1] str. 73



## 1.1 Rozdělení přístrojových transformátorů

- a) podle transformované veličiny rozlišujeme na transformátory :
- proudu
  - napětí
  - kombinované
- b) podle funkce dělíme transformátory na :
- měřicí
    - určené pro měřicí přístroje
    - musí být přesné v okolí jmenovitých hodnot
    - v přechodných stavech (zkrat, přepětí apod.) není vysoká přesnost vyžadována
    - při velkých nadproudech je žádoucí, aby se přesytily a tím omezovaly sekundární proud tak, aby nedošlo ke zničení měřicího přístroje
  - jisticí
    - určené pro ochrany
    - musí zajišťovat žádanou přesnost při velkých nadproudech a nízkých napětích
- c) podle umístění dělíme transformátory :
- pro vnitřní montáž
  - pro venkovní montáž
- d) podle druhu izolace
- vzduchové
  - olejové
  - epoxidové
- e) podle montáže
- f) podle převodu



## 1.2 Rozdělení přístrojových transformátorů napětí

a) podle způsobu transformace

- indukční

- kapacitní      - jsou složeny z kapacitního děliče, kompenzační tlumivky a izolačního indukčního transformátoru

b) podle počtu fází a podle izolace primárního vinutí

- jednofázové – jednopólově izolované

- dvoupólově izolované

- třífázové – uzemněné

- plně izolované



## 2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH VELIČIN

**Přístrojový transformátor** – transformátor určený k převodu měřené veličiny do měřicích přístrojů, elektroměrů, ochran a jiných podobných zařízení.

**Transformátor napětí** – přístrojový transformátor, u něhož je sekundární napětí za normálních provozních podmínek úměrné primárnímu napětí, fázový posun mezi fázory primárního a sekundárního napětí se při vhodném způsobu zapojení blíží nule.

**Dvoupólově izolovaný transformátor napětí** – transformátor napětí u něhož všechny části primárního vinutí včetně svorek jsou izolovány proti zemi na izolační hladinu, která odpovídá jmenovité izolační hladině.

**Jednopolově izolovaný transformátor napětí** – jednofázový transformátor napětí, který má jeden konec svého primárního vinutí přímo uzemněn nebo třífázový transformátor, který je určen pro zapojení primárního vinutí do hvězdy s přímo uzemněným nulovým bodem.

**Primární vinutí** – vinutí, na něž se přivádí napětí, které má být transformováno.

**Sekundární vinutí** – vinutí, na které jsou připojeny napěťové obvody měřicích přístrojů, elektroměrů, ochran nebo podobných zařízení.

**Sekundární obvod** – vnější obvod, který je připojen k sekundárnímu vinutí přístrojového transformátoru.

**Jmenovité primární napětí**  $U_{1n}$  – efektivní hodnota primárního napětí, pro které je transformátor konstruován a které je uvedeno na štítku transformátoru.

**Jmenovité sekundární napětí**  $U_{2n}$  – efektivní hodnota sekundárního napětí uvedená na štítku transformátoru, odpovídající podle jmenovitého převodu transformátoru jmenovitému sekundárnímu napětí. Toto napětí je u třífázových a dvoupólově izolovaných transformátorů 100 V nebo výjimečně 110 V a 120 V (hlavně pro export). U třífázových uzemněných a jednopolově izolovaných transformátorů pak je  $100/\sqrt{3}$  V nebo  $110/\sqrt{3}$  V a  $120/\sqrt{3}$  V (hlavně pro export). Jmenovité sekundární napětí pomocného vinutí jednopolově izolovaných transformátorů napětí je  $100/3$  V nebo  $110/3$  V a  $120/3$  V (hlavně pro export).

**Jmenovité napětí soustavy**  $U_n$  – efektivní hodnota napětí mezi vodiči (sdružené napětí), kterým se soustava označuje a podle kterého se stanoví její provozní charakteristiky. Jmenovitému napětí soustavy většinou odpovídá jmenovité primární napětí transformátoru.

**Izolační napětí transformátoru**  $U_1$  – efektivní hodnota napětí, kterému musí v trvalém provozu vyhovět izolace přístrojového transformátoru. (Izolační napětí je většinou totožné s nejvyšším napětím soustavy.)

**Nejvyšší napětí soustavy**  $U_m$  – nejvyšší efektivní hodnota napětí, které se může za normálních provozních podmínek v kterékoliv době a v kterémkoliv místě soustavy vyskytnout.

**Zkušební napětí střídavé**  $U_f$  – efektivní hodnota střídavého napětí s kmitočtem do 200 Hz, jímž se přístrojový transformátor zkouší zpravidla 1 minutu za předepsaných atmosférických podmínek.

**Zvýšené napětí**  $U_{nm}$  – napětí, které musí přístrojový transformátor napětí vydržet po stanovenou dobu trvání, přičemž nesmějí být překročeny dovolené hodnoty oteplení a musí být splněny příslušné požadavky třídy přesnosti (podle ČSN EN 60044-2).

**Činitel zvýšení napětí**  $K_{nm}$  – činitel, jehož součin s hodnotou jmenovitého primárního napětí dává hodnotu zvýšeného napětí.

$$K_{nm} \cdot U_{1n} = U_{nm} \quad [-; V; V] \quad (2.1)$$





**Břemeno transformátoru napětí  $Y$**  – součet admitancí přístrojů a přívodů připojených na sekundární svorky transformátoru.

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad [\text{S}; \text{S}] \quad (2.2)$$

**Jmenovité břemeno transformátoru napětí  $Y_n$**  – admitance, kterou lze transformátor napětí v měřicím rozsahu zatížit, aniž se překročí dovolené chyby.

**Zátěž transformátoru napětí  $P$**  – součin břemene a čtverce jmenovitého sekundárního napětí.

$$P = Y \cdot U_{2n}^2 \quad [\text{VA}; \text{S}, \text{V}] \quad (2.3)$$

**Jmenovitá zátěž transformátoru napětí  $P_n$**  – je uvedena na štítku transformátoru a rovná se součinu jmenovitého břemene a čtverce jmenovitého sekundárního napětí.

$$P_n = Y_n \cdot U_{2n}^2 \quad [\text{VA}; \text{S}, \text{V}] \quad (2.4)$$

Hodnoty jmenovitých zátěží přístrojových transformátorů napětí při induktivním účinníku 0,8 jsou: 10 15 25 30 50 75 100 150 200 300 400 500 VA  
Podtržené jsou přednostní.

**Krajní zátěž transformátoru napětí  $P_{ku}$**  – zátěž, kterou lze trvale zatížit sekundární vinutí při trvale zvýšeném napětí, přičemž chyba napětí nesmí překročit – 10 % a oteplení nesmí přesáhnout dovolenou mez.

**Sekundární účinník transformátoru napětí  $\cos \beta$**  – poměr vodivosti a admitance břemene.

$$\cos \beta = \frac{G}{Y} \quad [-; \text{S}] \quad (2.5)$$

**Skutečný převod** – poměr skutečného primárního napětí ke skutečnému sekundárnímu napětí.

$$k_{sk} = \frac{U_{1sk}}{U_{2sk}} \quad [-; \text{V}] \quad (2.6)$$

**Jmenovitý převod transformátoru napětí  $k_u$**  – poměr jmenovitého primárního napětí a jmenovitého sekundárního napětí.

$$k_u = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad [-; \text{V}] \quad (2.7)$$

**Chyba napětí (chyba převodu)  $\varepsilon_u$**  – chyba způsobená transformátorem napětí, která vyplývá z důvodu, že skutečný převod napětí není roven jmenovitému převodu. Její vyjádření je v % dáno vztahem.

$$\varepsilon_u = \frac{U_2 k_u - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad [\%; \text{V}] \quad (2.8)$$

Chyba napětí je kladná, je-li součin naměřené sekundární hodnoty napětí a převodu ( $U_2 \cdot k_u$ ) větší než skutečná (správná) primární hodnota.

**Chyba úhlu transformátoru napětí  $\delta_u$**  – fázový rozdíl mezi fázory primárního a sekundárního napětí, směr fázoru je volen tak, že u ideálního transformátoru napětí je chyba úhlu nulová.

**Měřicí rozsah** – rozsah primárních hodnot transformované veličiny, pro který jsou stanoveny dovolené hodnoty chyb a dovolené oteplení.



**Jistící rozsah** - rozsah primárních hodnot transformované veličiny, pro který jsou stanoveny hodnoty chyb pro účely jistění.

**Třída přesnosti  $T_p$**  – označení přidělené přístrojovému transformátoru proudu nebo napětí, které určuje jeho největší dovolené chyby při předepsaných podmínkách provozu.

#### **Třídy přesnosti měřicích transformátorů napětí**

Podle dovolených chyb se měřicí transformátory napětí s ohledem na použití zařazují do tříd přesnosti  $T_p$  : 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3

#### **Třídy přesnosti jisticích transformátorů napětí**

Třídy přesnosti jsou v tomto případě  $T_p$  : 3P, 6P

#### **Dovolené chyby měřicích transformátorů napětí**

Chyba napětí a chyba úhlu měřicích transformátorů napětí tříd přesnosti 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 v rozsahu 25 % až 100 % jmenovitého břemene, při induktivním účinníku  $\cos\beta = 0,8$ , při napětí v rozsahu 80 až 120 % napětí jmenovitého a při jmenovitém kmitočtu nesmějí přesáhnout hodnoty uvedené v Tab. 2-1. Chyby musí být stanoveny na svorkách transformátoru a musí zahrnovat vliv pojistek nebo rezistorů, které jsou součástí transformátoru.

*Tab. 2-1 Dovolené chyby měřicích transformátorů napětí - [5]*

Třídy přesnosti měřicích transformátorů napětí $T_p$	Dovolené chyby napětí $\varepsilon_u$ a úhlu $\delta_u$	
	Měřicí rozsah 80 % až 100 % $U_{1n}$	
	$\pm\varepsilon_u$	$\pm\delta_u$
	[%]	[min]
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1,0	40
3	3,0	není omezena

Jestliže je však u transformátorů napětí 25% jmenovité zátěže větší než 15 VA, musí být chyby v dovolených mezích podle tabulky již od zátěže 15 VA.

#### **Dovolené chyby jisticích transformátorů napětí**

Chyba napětí a chyba úhlu jisticích transformátorů napětí třídy přesnosti 3P a chyby napětí transformátorů třídy 6P v rozsahu 25 až 100 % jmenovité hodnoty zátěže, při jmenovitém sekundárním účinníku  $\cos\beta = 0,8$  a při napětí o jmenovitém kmitočtu, v rozsahu od 5 % jmenovitého napětí až do zvýšeného napětí nesmí přesáhnout hodnoty uvedené v Tab. 2-2.

*Tab. 2-2 Dovolené chyby jisticích transformátorů napětí - [5]*

Třída přesnosti $T_p$	Chyba napětí	Chyba úhlu
	$\pm\varepsilon_u$	$\pm\delta_u$
	[%]	[minut]
3 P	3	120
6 P	6	240

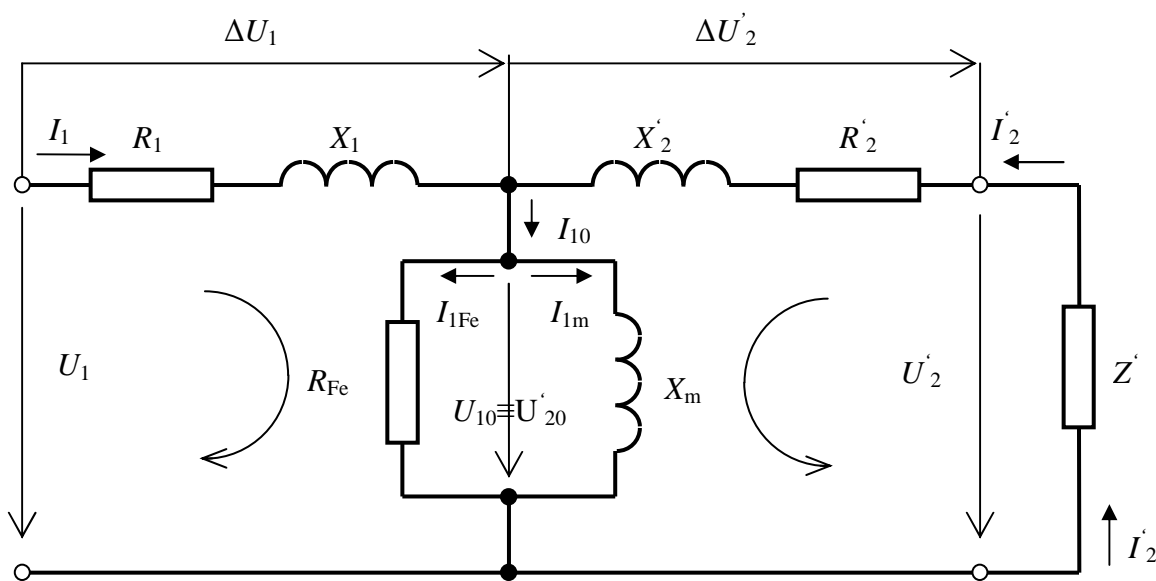
## 3 ROZBOR FUNKCE PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ

### 3.1 Charakteristika funkce

Přístrojové transformátory napětí napájejí napět'ové systémy přístrojů měřicích, jisticích a regulačních. Jejich primární vinutí je zapojeno paralelně k obvodu (vedení), jehož napětí se transformuje do obvodu sekundárního (připojených přístrojů). Charakteristické vlastnosti jsou proto obdobné jako u transformátorů výkonových a transformátor napětí je ve své podstatě výkonový transformátor o malém typovém výkonu a malém napětí nakrátko (malé průchozí impedanci). Poměr počtu závitů vinutí primárního  $N_1$  a sekundárního  $N_2$  se rovná (nehledíme-li v prvním přiblížení k chybě napětí) poměru primárního napětí  $U_1$  a sekundárního napětí  $U_2$ , kdežto proudy v obou vinutích závisejí na zátěži odebírané na sekundárních svorkách a na budícím příkonu podobně jako u výkonových transformátorů.

Náhradní schéma i fázorový diagram u přístrojových transformátorů napětí jsou v podstatě stejné jako u běžných transformátorů obr. 3-1. Pro sledování velikosti chyb u přístrojových transformátorů je nejdůležitější úbytková část diagramu při zachování skutečných směrů proudů a napětí.

### 3.2 Náhradní schéma



Obr. 3-1 Náhradní schéma napět'ového transformátoru - [1] str. 76

Jak je patrné z náhradního schématu obr. 3-1 pro jednotlivé obvody platí

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 + \bar{U}_{10} \quad (3.1)$$

$$\bar{U}'_2 = R'_2 \bar{I}'_2 + jX'_2 \bar{I}'_2 + \bar{U}'_{20} \quad (3.2)$$

Vzhledem k tomu, že platí

$$\bar{U}_{10} \equiv \bar{U}'_{20} \quad (3.3)$$



a 
$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} - \bar{I}_2' \quad (3.4)$$

postupnou úpravou vztahů (3.1), (3.2) a (3.3) obdržíme :

$$\bar{U}_1 - R_1 \bar{I}_1 - jX_1 \bar{I}_1 = \bar{U}_2' - R_2' \bar{I}_2' - jX_2' \bar{I}_2' \quad (3.5)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + (R_1 + jX_1) \bar{I}_1 + (R_2' + jX_2')(-\bar{I}_2') \quad (3.6)$$

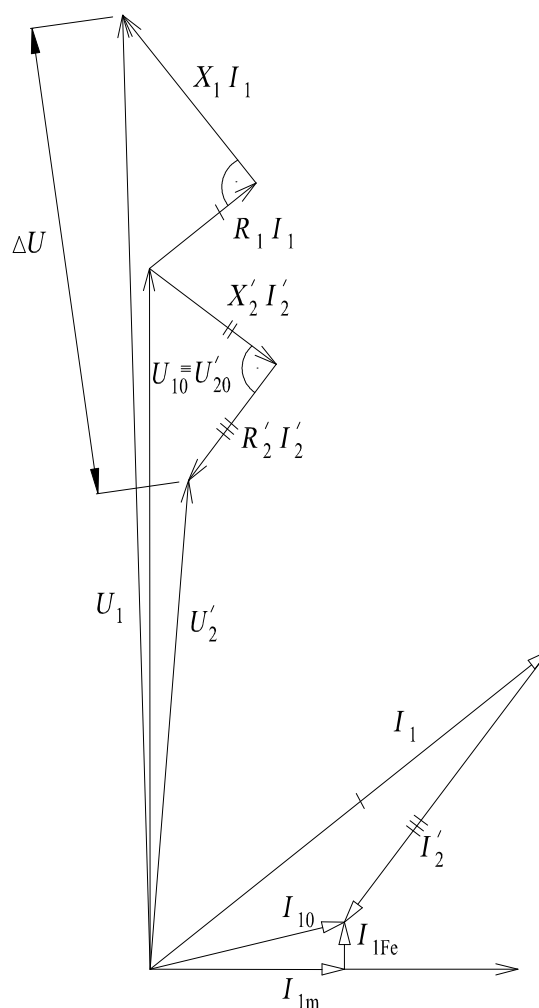
úpravou (3.4) a (3.6) dostaneme :

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + (R_1 + jX_1) \bar{I}_{10} + (R_1 + R_2' + jX_1 + jX_2')(-\bar{I}_2') \quad (3.7)$$

### 3.3 Fázorový diagram

Fázorový diagram představuje grafické zobrazení předcházejících vztahů (rovníc), jak je patrné na obr. 3-2. Pro napětí  $U_1$  z náhradního schéma vyplývá :

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + \Delta \bar{U}_1 + \Delta \bar{U}_2 \quad (3.8)$$



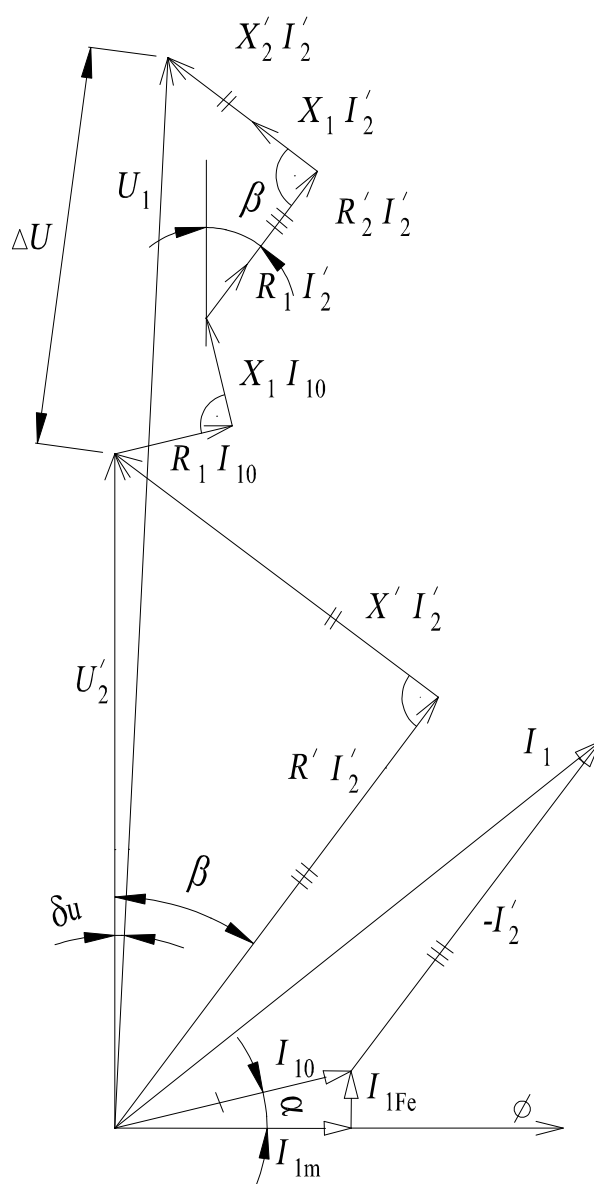
Obr. 3-2 Fázorový diagram pro transformátory napětí - [1] str. 77



Napětí  $U_1$  u napěťového transformátoru je vlastně napětí na vstupních svorkách transformátoru A-B a skládá se z úbytku na primárním vinutí, sekundárním vinutí a z napětí na vnějším břemeni  $Z$ .

Při kreslení fázorového diagramu vyjdeme od fázoru  $U_2'$  a položíme ho do svislé osy. Fázor magnetického toku budeme uvažovat kolmý na fázor  $U_2'$ . Dopustíme se přitom jen malé nepřesnosti, protože mezi fázorem  $U_2'$  a  $U_{20}'$  bývá velice malý úhel.

Při vyhodnocování chyb transformátoru napětí si budeme všimnout hlavně horní části fázorového diagramu, tj. fázoru úbytku napětí  $\Delta U$  a jeho složek obr. 3-3.



Obr. 3-3 Fázorový diagram pro transformátor napětí pootočený - [1] str. 77

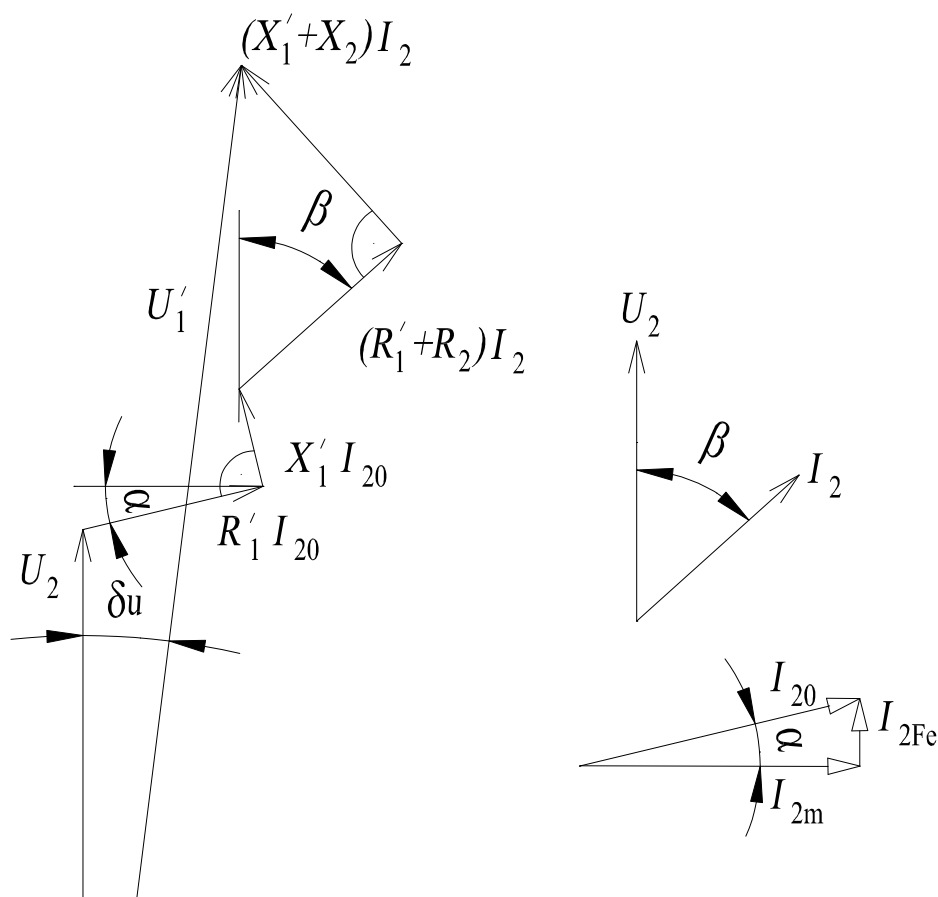


Při další úpravě kreslení budeme kreslit pouze úbytkovou část fázorového diagramu s tím, že jako výchozí fázor budeme brát fázor  $U_2$  a s měnícím se zatížením se bude měnit fázor  $U_1$ . Protože sekundární napětí budeme uvažovat jako výchozí veličinu, je pak výhodné užívat hodnot primárního napětí, proudu a impedance, případně vodivosti, přepočtených na sekundární počet závitů obr. 3-4. Proud  $I_{20}$  je pak proud naprázdno, přepočtený na sekundární počet závitů ( $= I_{10}'$ ).

Přepočty :

$$U_1' = U_1 \frac{N_2}{N_1}; U_1 I_1 = U_1' I_1' \quad (3.9, 3.10)$$

$$I_1' = I_1 \frac{N_1}{N_2}; R_1' = R_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (3.11, 3.12)$$



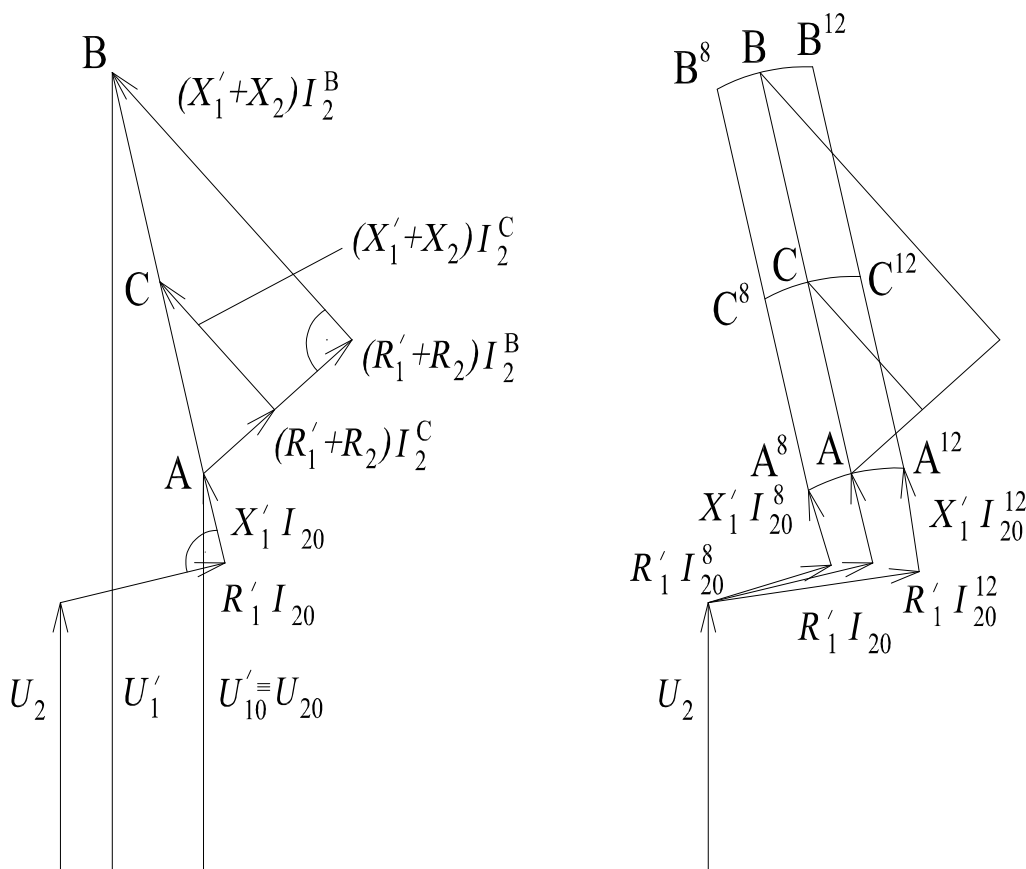
Obr. 3-4 Fázorový diagram s úbytkovou částí přepočtený na sekundární závitů – [1] str. 78

Vzhledem k tomu, že úhel  $\delta_u$  bývá u přístrojových transformátorů napětí velmi malý (viz tab. 2-1 a tab. 2-2), můžeme fázory  $U_1'$  a  $U_2$  kreslit jako rovnoběžné, bez podstatného vlivu na přesnost vyhodnocování chyb napěťového transformátoru. Sledujme nyní, jak se bude měnit poloha koncového bodu fázoru  $U_1'$  se změnou zátěže na sekundárních svorkách transformátoru a změnou napětí  $U_1$ .



Při změně zátěže se bude koncový bod fázoru  $U_1'$  pohybovat po úsečce AB, přičemž bod B odpovídá jmenovité zátěži a bod A stavu naprázdno (úbytek od proudu  $I_2$  je roven nule). Bod C pak odpovídá obecné zátěži viz obr. 3-5 vlevo.

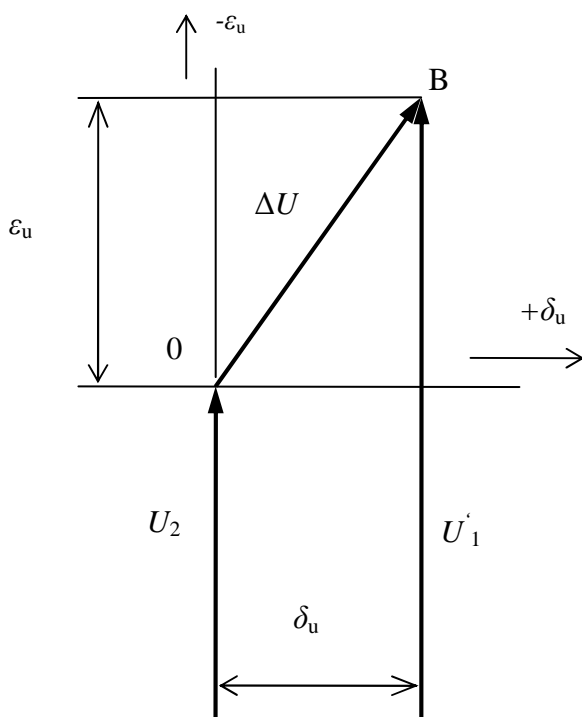
Když budeme navíc ještě uvažovat změnu napětí  $U_1$ , bude se koncový bod fázoru  $U_1'$  při jednotlivých zátěžích pohybovat způsobem, jak je znázorněno na obr. 3-5 vpravo. Přičemž body A12, B12, C12 odpovídají zvýšení napětí  $U_1$  na 120 % a body A8, B8, C8 odpovídají jeho snížení na 80 %. Tuto změnu polohy koncového bodu fázoru  $U_1'$  lze vysvětlit odpovídající změnou fázoru  $I_{20}$ , čili změnou magnetické indukce v magnetickém obvodu.



Obr. 3-5 Fázorový diagram pro změnu zátěže a změnu napětí  $U_1$  - [1] str. 78

### 3.4 Chyby transformátoru napětí a diagramy chyb

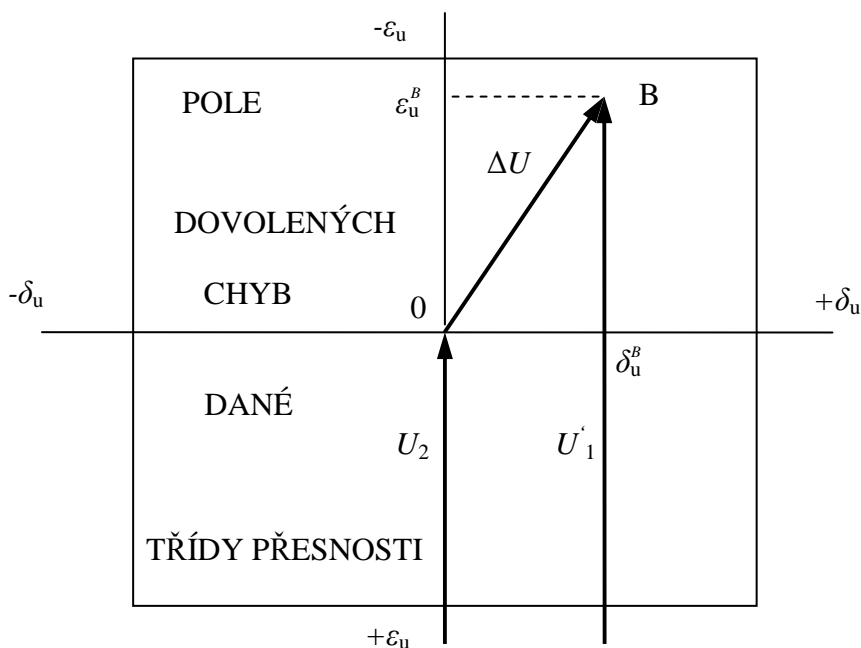
Jak bylo uvedeno v předcházející kapitole, budeme se zabývat jen horní částí fázorového diagramu tj. úbytky napětí na jednotlivých složkách impedance přístrojového transformátoru. Za počátek souřadnicové soustavy budeme považovat koncový bod fázoru  $U_2$ . Fázorový rozdíl mezi fázory  $U_1'$  a  $U_2$  označíme jako fázorovou chybu  $\Delta U$ .



Takto vyjádřená fázorová chyba nemá pro nás praktický význam a proto ji rozložíme na dvě na sebe kolmé složky, pomocí kterých určíme chybu napětí  $\varepsilon_u$  a chybu úhlu  $\delta_u$ . Jak je v tabulkách tab. 2-1 a tab. 2-2 uvedeno, u  $\delta_u$  se jedná o velmi malé chyby úhlu, pak fázory  $U_2$  a  $U'_1$  můžeme považovat za rovnoběžné a oblouk se středem v počátku fázoru  $U_2$  o poloměru  $U_2$  můžeme nahradit přímkou. Fázorovou chybu napětí  $\Delta U$  takto bez podstatného vlivu na přesnost vyhodnocování rozkládáme na složky  $\varepsilon_u$  a  $\delta_u$ , přičemž  $\varepsilon_u$  představuje chybu napětí a  $\delta_u$  chybu úhlu, kterou však musíme vyjádřit v minutách (viz obr. 3-6). Převod chyby úhlu  $\delta_u$  vyjádřené v procentech na vyjádření v minutách objasníme v následující kapitole.

Obr. 3-6 Základ pro vytvoření komplexního diagramu chyb – [1] str. 79

### 3.5 Komplexní diagram chyb a pole dovolených chyb



Obr. 3-7 Komplexní diagram chyb – [1] str. 79

Komplexní diagram chyb transformátoru napětí vyjadřuje současně chybu napětí i chybu úhlu. Jestliže na příslušné osy vyneseme hranice chyb podle dané třídy přesnosti, dostáváme dovolené pole chyb v komplexním diagramu chyb. Koncový bod fázoru  $U'_1$  se tedy musí





pohybovat uvnitř tohoto pole chyb viz obr. 3-7. Vyjdeme z toho, že fázory jsou vyneseny v %. Vzhledem k tomu, že podle příslušné ČSN je chyba úhlu vyjadřována v minutách, musíme tedy chybu úhlu na minuty přepočítat.

Způsob převodu chyby úhlu „a“ vyjádřené v procentech na chybu úhlu  $\delta_u$  vyjádřené v minutách objasňuje obr. 3-8, přičemž fázory  $U_2$  a  $U'_1$  jsou ve skutečnosti podstatně delší proti fázoru  $\Delta U$ , který je vůči nim minimální. Délka oblouku (část kružnice) o poloměru  $U_2$  [%] od bodu O do bodu A na fázoru  $U'_1$  [%], splňuje pro velmi malé úhly  $\delta_u$  [min] vztah

$$a \cong \overline{OA} = \overline{\delta_u}. \quad (3.13)$$

Pro úhel  $\delta_u$  potom platí

$$\operatorname{tg} \delta_u = \frac{a}{100} \cong \frac{\overline{\delta_u}}{100}. \quad (3.14)$$

Vzhledem k tomu, že

$$\overline{\delta_u} = \frac{\pi}{180 \cdot 60} \delta_u \quad [%; \text{ min}] \quad (3.15)$$

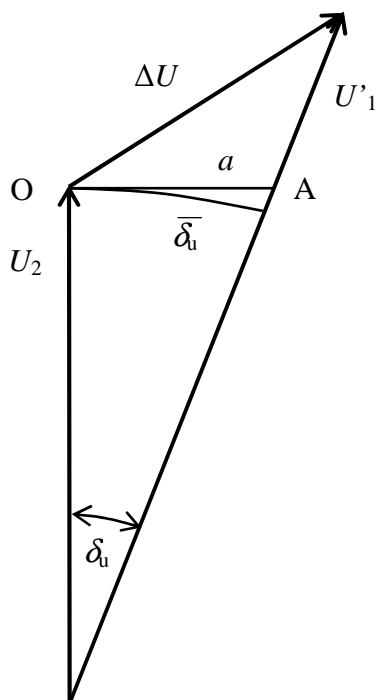
potom platí

$$a \cong \overline{\delta_u} = 0,0291 \cdot \delta_u \quad [%; \text{ min}]. \quad (3.16)$$

Naopak, máme-li „a“ [%] přepočítat na  $\delta_u$  [min]

$$\delta_u = 34,4 \cdot a \quad [\text{min}; \%]. \quad (3.17)$$

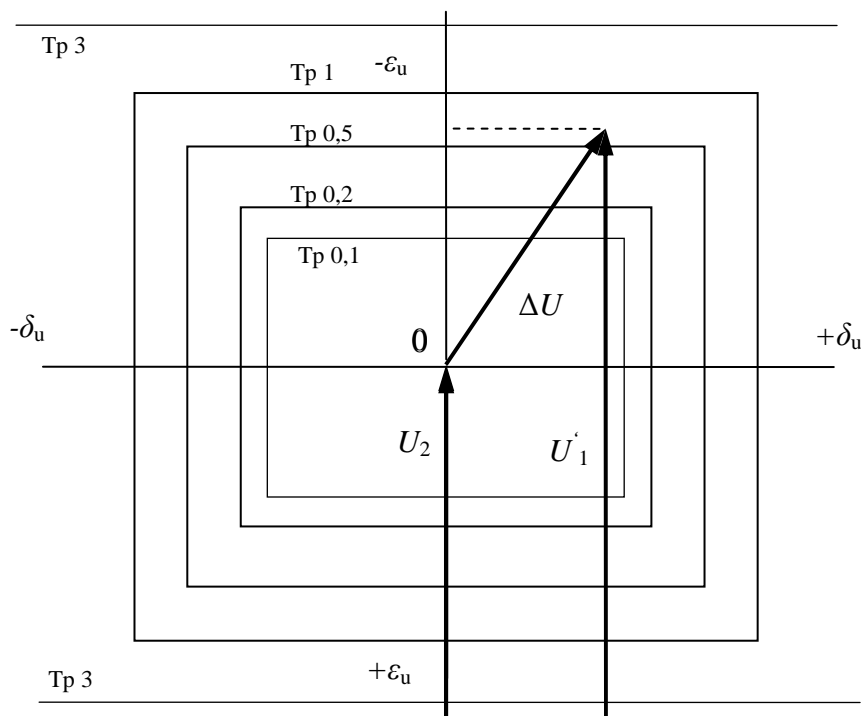
Například chybě  $\delta_u = 10'$  odpovídá vzdálenost „a“ = 0,291 % a pro „a“ = 1 % odpovídá velikost  $\delta_u = 34,4'$ . Na vodorovné ose pak můžeme vynést přímo měřítko chyby úhlu v minutách.



Obr. 3-8 Převod a [%] na  $\delta_u$  [min]

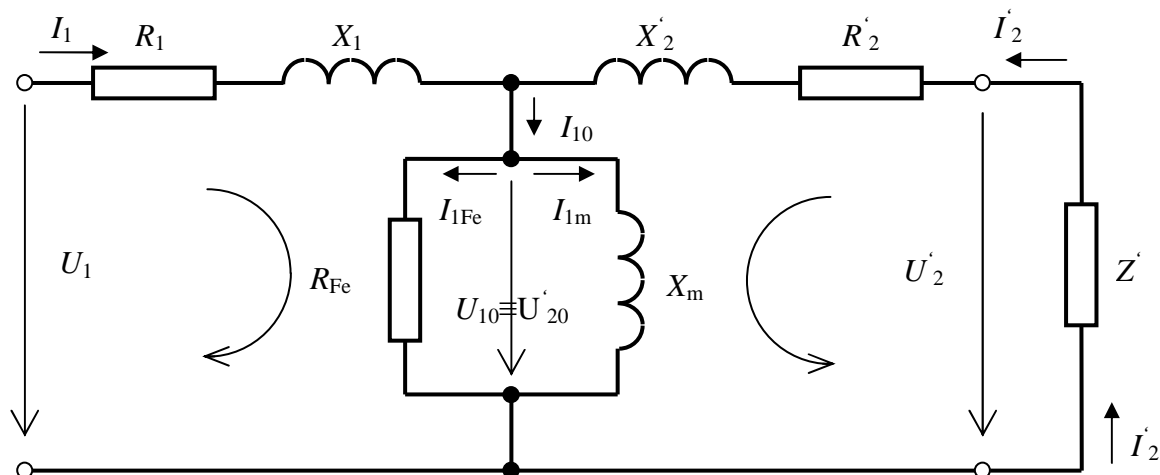


Obdélník na obr. 3-9 vyjadřuje pole dovolených chyb daných třídou přesnosti (viz tab. 2-1). Při zahrnutí všech tříd přesnosti z tab. 2-1 pak dostaneme kompletní komplexní diagram chyb se všemi mezemi danými třídami přesnosti z tab. 2-1 a v případě zjištění, že nám některý kontrolovaný napěťový transformátor nevyhovuje požadované třídě přesnosti, může být přeřazen do nižší třídy přesnosti.



Obr. 3-9 Kompletní komplexní diagram chyb – znázornění všech tříd přesnosti

## 4 PRVKY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU A JEJICH VLIV NA CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ

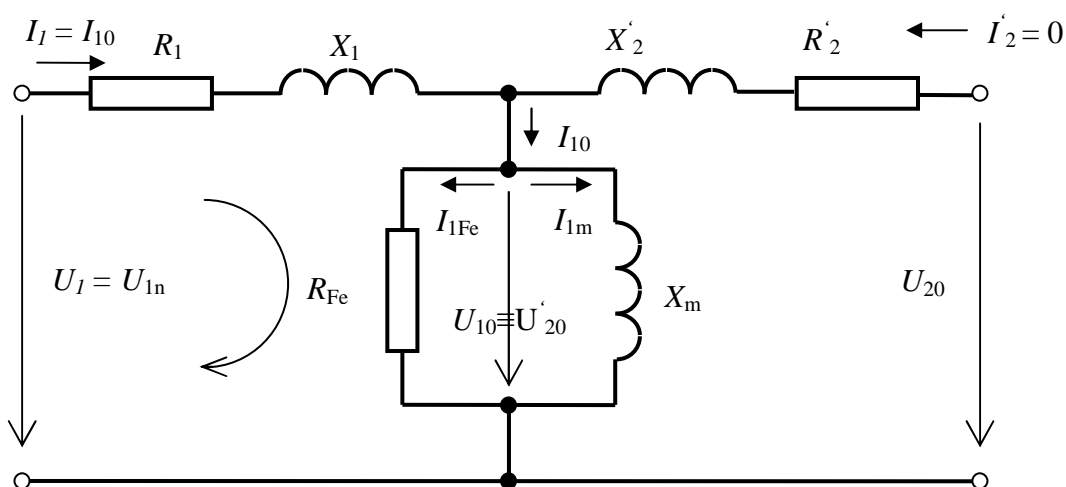


Obr. 4-1 Prvky náhradního schématu

Na náhradním schématu jsou znázorněny prvky, které nám ovlivňují chyby transformátoru napětí. Nejmenší chybu transformátoru napětí dosáhneme při stavu naprázdno. Prvky, které nám ovlivňují výslednou chybu přístrojového transformátoru napětí jsou: břemeno, napětí, sekundární účinník, kmitočet.

### 4.1 Napěťový transformátor naprázdno

Stav naprázdno nastane u transformátorů při rozpojených svorkách výstupního vinutí, kdy proud  $I_2 = I'_2 = 0$ . Na vstupu můžeme nastavit jmenovitou hodnotu vstupního napětí  $U_1 = U_{1n}$  a odečteme vstupní proud  $I_1 = I_{10}$  příkon  $P_0$  a napětí  $U_{20}$ . Příkon naprázdno představuje ztráty transformátoru v železe  $P_0 = P_{Fe}$ . Tento stav je znázorněn ve zjednodušeném náhradním schématu na obr. 4-2.



Obr. 4-2 Náhradní schéma transformátoru naprázdno



Pro náhradní schéma na obr. 4-2 platí :

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_{10} + jX_1 \bar{I}_{10} + \bar{U}_{10} \quad (4.1)$$

kde  $R_1 I_{10}$  je úbytek napětí na činném odporu vinutí

$X_1 I_{10}$  je úbytek napětí na rozptylové reaktanci primárního vinutí

a dále platí vztah (3.3)

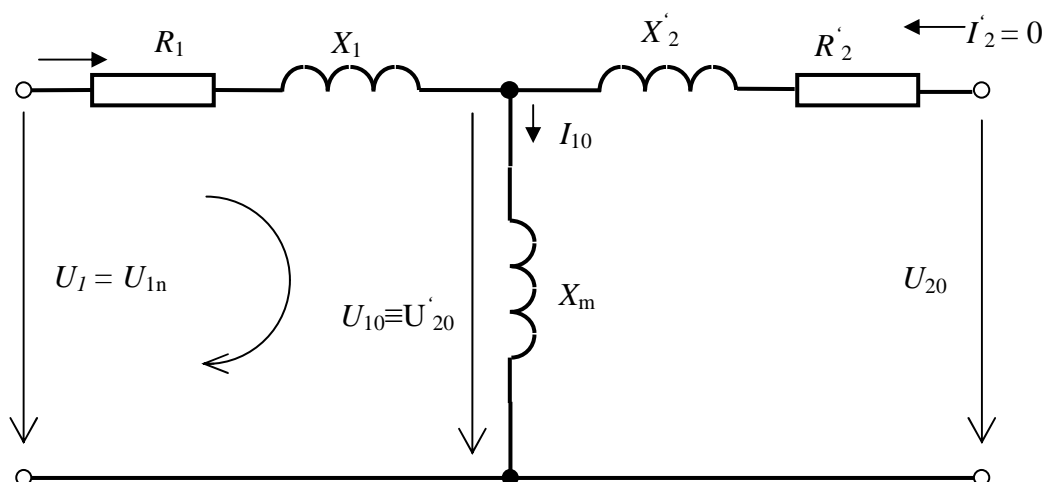
Napětí  $U_{10}$  je vlastně indukované od společného toku a pro jeho velikost platí

$$U_{10} = 4,44 f \phi N_1 \quad (4.2)$$

U skutečného transformátoru musíme ještě uvažovat ztráty v železe  $P_{Fe}$ , které si nahradíme ztrátami v ekvivalentním činném odporu

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{Fe}} \quad (4.3)$$

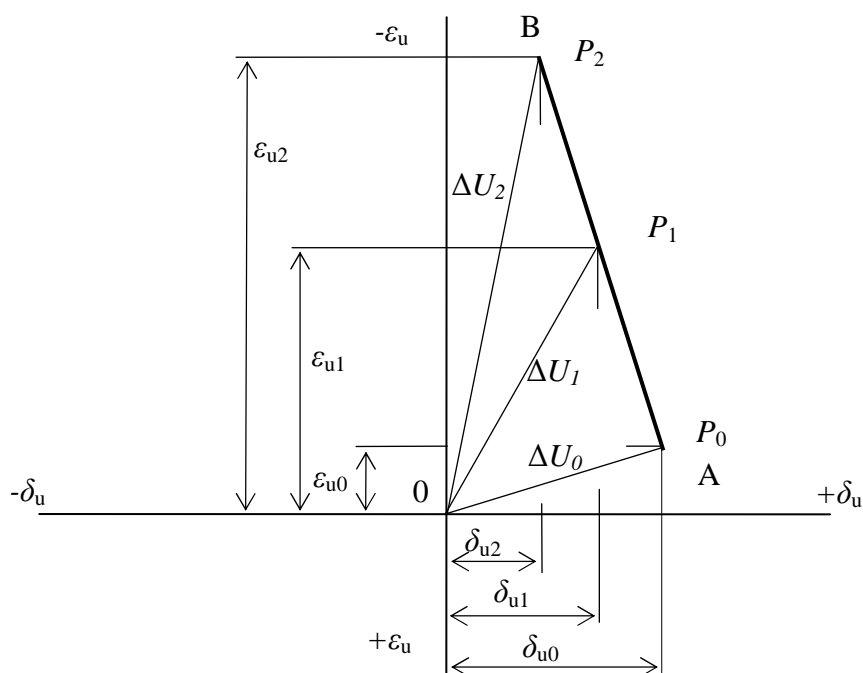
Pokud bychom zanedbali ztráty v železe, pak by měl proud naprázdno čistě induktivní charakter a náhradní schéma by bylo zjednodušené obr. 4-3.



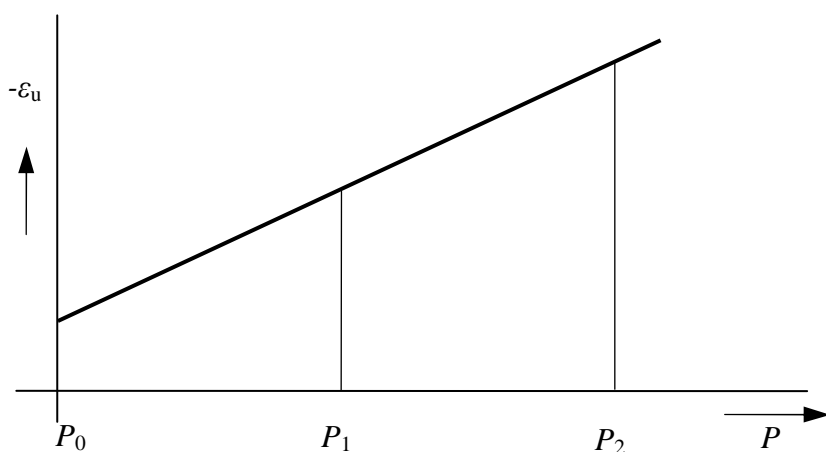
Obr. 4-3 Náhradní schéma transformátoru naprázdno při zanedbání ztrát v železe

## 4.2 Vliv břemene na chyby přístrojového transformátoru napětí

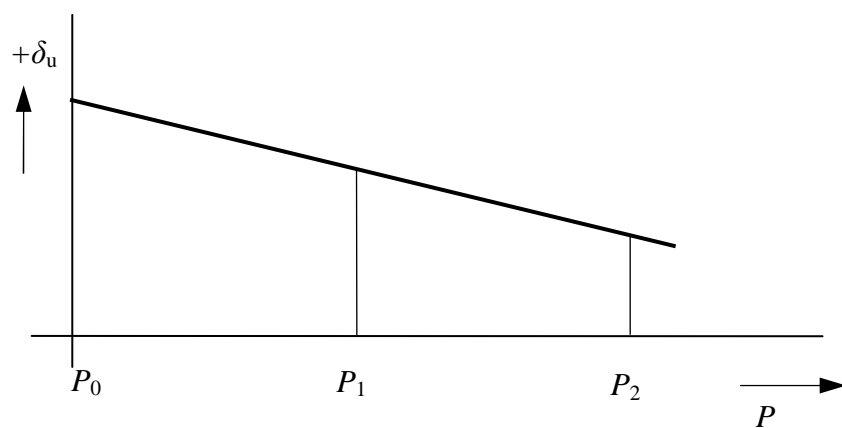
Úsečka AB z obr. 3-5 je vlastně přeponou v trojúhelníku úbytku napětí od proudu  $I_2$  a lze na ní přímo vynést stupnici zátěže nebo břemena. Obr. 4-4 znázorňuje závislost chyb na břemeni v komplexním diagramu chyb, obr. 4-5 závislost chyby napětí na břemeni a obr. 4-6 závislost chyby úhlu na břemeni.



Obr. 4-4 Závislost chyb na břemeni v komplexním diagramu chyb



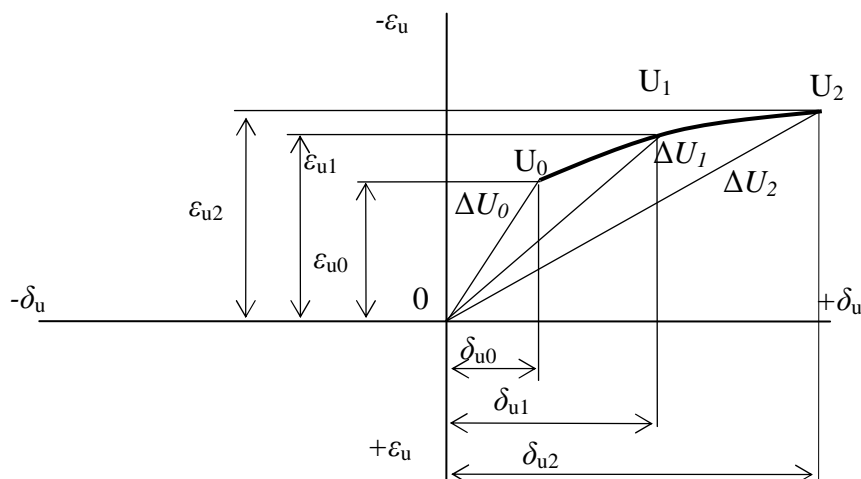
Obr. 4-5 Závislost chyby napětí na břemeni  $\varepsilon_u = f(P)$



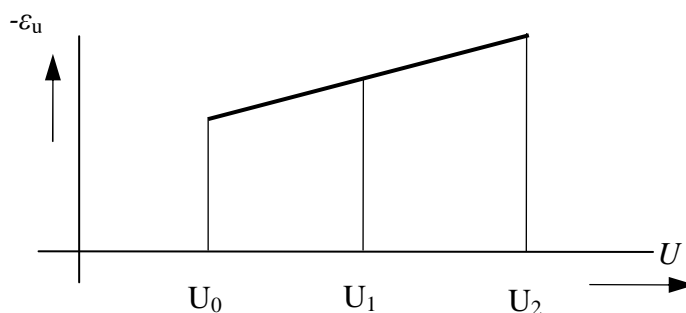
Obr. 4-6 Závislost chyby úhlu na břemeni  $\delta_u = f(P)$

### 4.3 Vliv napětí na chyby přístrojového transformátoru napětí

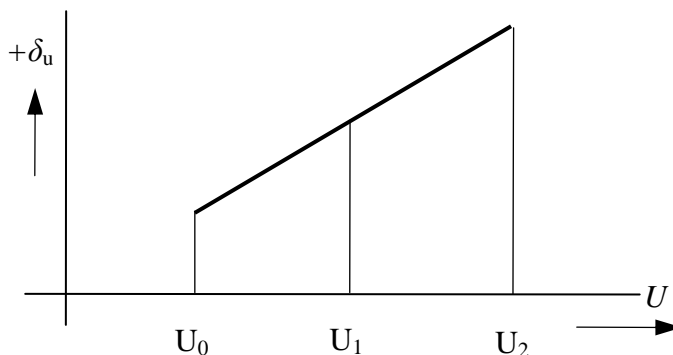
Podstatu této závislosti jsme již řešili v kapitole 3.3 a na fázorovém diagramu obr. 3-5. Nyní si uvedeme jak se tato závislost projeví v komplexním diagramu chyb obr. 4-7 a v závislostech  $\varepsilon_u = f(U)$  obr. 4-8 a  $\delta_u = f(U)$  obr. 4-9. Tyto závislosti mají charakter přímky pokud se příslušné pracovní body nachází v lineární části magnetizační charakteristiky. Jestliže se dostaneme do oblasti vyšších magnetických indukcí (blízko „kolena“), dochází k zakřivení těchto závislostí.



Obr. 4-7 Závislost chyb na napětí v komplexním diagramu chyb



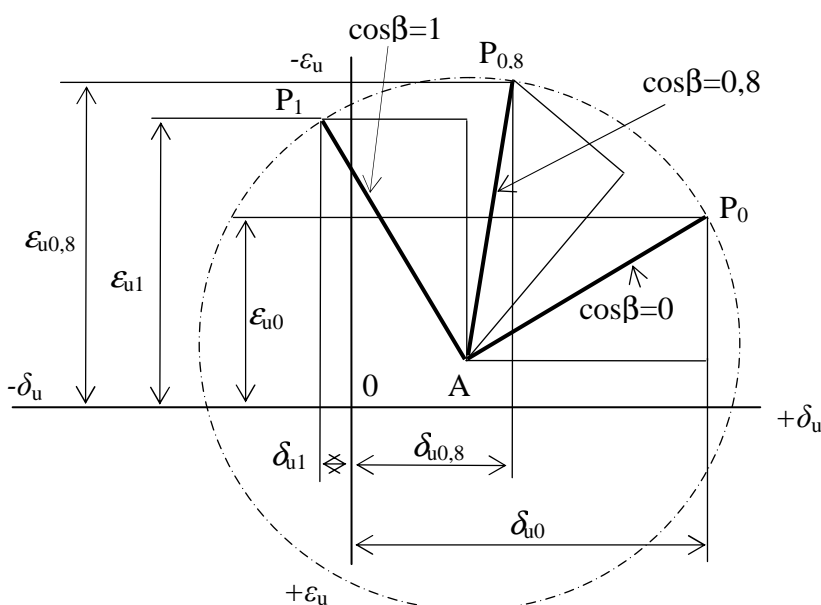
Obr. 4-8 Závislost chyby napětí na napětí  $\varepsilon_u = f(U)$



Obr. 4-9 Závislost chyby úhlu na napětí  $\delta_u = f(U)$

#### 4.4 Vliv sekundárního účinníku na chyby přístrojového transformátoru napětí

Tuto závislost si můžeme představit tak, že bod naprázdno „A“ zůstává na místě a natáčí se vlastně zatěžovací trojúhelník (trojúhelník úbytků napětí od proudu  $I_2$ ). Koncový bod popisuje kružnici se středem v bodu A.



Obr. 4-10 Závislost chyb na sekundárním účinníku v komplexním diagramu chyb

#### 4.5 Vliv kmitočtu na chyby přístrojového transformátoru napětí

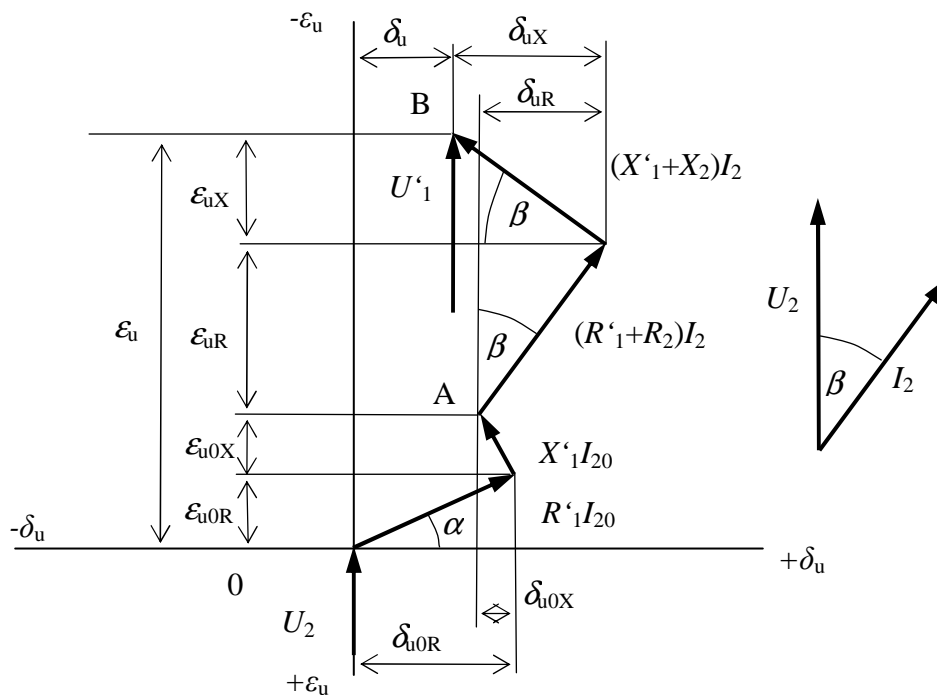
Při trvalém přizpůsobení transformátoru na jiný kmitočet se u něj musí změnit počet závitů nepřímo úměrně s kmitočtem, aby magnetická indukce zůstala konstantní. Rozptylová reaktance se mění s kmitočtem, protože platí vztah

$$X = 2 \pi f L \quad (4.4)$$

Jinak je třeba každou změnu kmitočtu posuzovat případ od případu, protože se změnou kmitočtu dochází ke změně magnetizačního příkonu železa a ke změně činných ztrát v železe.

## 5 VÝPOČET CHYB

### 5.1 Výpočet chyb a jejich složek



Obr. 5-1 Znáznornění chyby napětí, chyby úhlu a jejich složek

Chyba napětí způsobená zatěžováním proudem  $I_2$

$$\varepsilon_{uR} = \frac{100}{U_2} (R'_1 + R_2) I_2 \cos \beta \quad [\%; V, \Omega, A, ^\circ] \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{uX} = \frac{100}{U_2} (X'_1 + X_2) I_2 \sin \beta \quad [\%; V, \Omega, A, ^\circ] \quad (5.2)$$

Chyba napětí způsobená proudem naprázdno

$$\varepsilon_{u0R} = \frac{100}{U_2} R'_1 I_{20} \sin \alpha = \frac{100}{U_2} R'_1 I_{2Fe} \quad [\%; V, \Omega, A, ^\circ] \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{u0X} = \frac{100}{U_2} X'_1 I_{20} \cos \alpha = \frac{100}{U_2} X'_1 I_{2m} \quad [\%; V, \Omega, A, ^\circ] \quad (5.4)$$

Úhel  $\alpha$  je úhel mezi budícím proudem a jeho magnetizační složkou (obr. 3-4 nebo obr. 5-1).

Chyba úhlu způsobená zatěžovacím proudem  $I_2$

$$\delta_{uR} = \frac{3440}{U_2} (R'_1 + R_2) I_2 \sin \beta \quad [\text{min}; V, \Omega, A, ^\circ] \quad (5.5)$$





$$\delta_{uX} = \frac{3440}{U_2} (X_1' + X_2) I_2 \cos(180 - \beta) \quad [\text{min}; \text{V}, \Omega, \text{A}, ^\circ] \quad (5.6)$$

Chyba úhlu způsobená proudem naprázdno

$$\delta_{u0R} = \frac{3440}{U_2} R_1' I_{20} \cos \alpha = \frac{3440}{U_2} R_1' I_{2m} \quad [\text{min}; \text{V}, \Omega, \text{A}, ^\circ] \quad (5.7)$$

$$\delta_{u0X} = \frac{3440}{U_2} X_1' I_{20} \cos(90 + \alpha) = \frac{3440}{U_2} X_1' (-I_{2Fe}) \quad [\text{min}; \text{V}, \Omega, \text{A}, ^\circ] \quad (5.8)$$

Výsledná chyba napětí pak bude

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{u0R} + \varepsilon_{u0X} + \varepsilon_{uR} + \varepsilon_{uX} \quad [\%; \%] \quad (5.9)$$

Podobně výsledná chyba úhlu

$$\delta_u = \delta_{u0R} + \delta_{u0X} + \delta_{uR} + \delta_{uX} \quad [\text{min}; \text{min}] \quad (5.10)$$

Poznámka: ve vztahu (5.10) budou mít složky  $\delta_{u0X}$  a  $\delta_{uX}$  ve většině případů záporné znaménko (obr. 5-1).

Pro další výklad zavedeme pojem průchozího odporu

$$R = R_1' + R_2 \quad [\Omega; \Omega] \quad (5.11)$$

průchozí reaktance

$$X = X_1' + X_2 \quad [\Omega; \Omega] \quad (5.12)$$

a průchozí impedance

$$Z = R + jX \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (5.13)$$

Z odvození jednotlivých složek chyb můžeme posoudit, které veličiny mají vliv na velikost chyb transformátoru napětí. Vidíme, že na velikost chyby napětí má podstatný vliv hodnota složek průchozí impedance a na chybu úhlu pak na prvním místě hodnota magnetické indukce (závisí na ní proud naprázdno) a na druhém místě průchozí impedance.

## 5.2 Úprava chyb – závitová korekce

Transformátor napětí, jehož závitový převod se rovná převodu jmenovitému, využívá svým polem skutečných chyb napětí jen zápornou polovinu pole dovolených chyb napětí. Prakticky by to znamenalo nevyužitý magnetický obvod navrženého transformátoru napětí a tudíž jeho neekonomické provedení. Využití pole dovolených chyb se zlepší posunutím pole skutečných chyb v poli dovolených chyb tak, aby se obsáhla i kladná polovina pole dovolených chyb napětí. Proto je nutné upravit počty závitů napěťového transformátoru tak, abychom dosáhli takového zvýšení sekundárního napětí, aby chyba při nejmenší požadované zátěži byla kladná a co nejbližší hranici dovoleného pole chyb pro požadovanou třídu přesnosti transformátoru. Toto zvýšení sekundárního napětí transformátoru dosáhneme buď zvýšením počtu závitů sekundárního vinutí, nebo častěji z důvodu jemnosti prováděné korekce snížením počtu závitů na primárním vinutí. Jestliže tedy požadujeme posunutí chyb o  $\nu \%$ , pak velikost závitové korekce je



$$\Delta N^k = N \frac{\nu}{100} \quad [-; -; -, \%] \quad (5.14)$$

$$N^k = N \pm \Delta N^k \quad [-; -, -] \quad (5.15)$$

kde  $N$  je původní počet závitů vinutí, na kterém chceme provádět korekci,  
 $N^k$  je nový počet závitů vinutí po korekci,  
 $\Delta N^k$  je závitová korekce (počet závitů o které změníme původní počet závitů  $N$ ),  
 $\nu$  je procentní velikost závitové korekce a  
 $\pm$  znaménko je kladné při korekci závitů sekundárního vinutí (zvětšení počtu závitů) a záporné při korekci primárního vinutí (zmenšení počtu závitů) transformátoru napětí.

V případě provádění korekce zvětšením počtu závitů na sekundárním vinutí pro korigovaný počet závitů  $N_2^k$  bude platit

$$N_2^k = N_2 + \Delta N_2^k = N_2 + N_2 \frac{\nu}{100} = N_2 \left( 1 + \frac{\nu}{100} \right) \quad [-; -, \% ; -, \%] \quad (5.16)$$

V případě provádění korekce zmenšením počtu závitů primárního vinutí pro korigovaný počet závitů  $N_1^k$  bude platit

$$N_1^k = N_1 - \Delta N_1^k = N_1 - N_1 \frac{\nu}{100} = N_1 \left( 1 - \frac{\nu}{100} \right) \quad [-; -, \% ; -, \%] \quad (5.17)$$

Při korekci na primárním vinutí pro poměr sekundárních napětí a závitů primárního vinutí korigovaného a nekorigovaného transformátoru principiálně platí

$$\frac{U_2^k}{U_2} = \frac{N_1}{N_1^k} \quad [V; -], \quad (5.18)$$

$$U_2^k N_1^k = U_2 N_1 \quad [V, -; V, -]. \quad (5.19)$$

Dosazením vztahu (5.17) a do vztahu (5.18)

$$\frac{U_2^k}{U_2} = \frac{1}{1 - \frac{\nu}{100}} = \frac{1}{1 - \nu \cdot 10^{-2}} \quad [V; \% ; \%]. \quad (5.20)$$

Úpravou vztahu (5.20)

$$\frac{U_2^k}{U_2} = \frac{1}{1 - \nu \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1 + \nu \cdot 10^{-2}}{1 + \nu \cdot 10^{-2}} \quad [V; \%], \quad (5.21)$$

$$\frac{U_2^k}{U_2} = \frac{1 + \nu \cdot 10^{-2}}{1 - \nu \cdot 10^{-2} + \nu \cdot 10^{-2} - \nu^2 \cdot 10^{-4}} \quad [V; \%], \quad (5.22)$$

$$\frac{U_2^k}{U_2} = \frac{1 + \nu \cdot 10^{-2}}{1 - \nu^2 \cdot 10^{-4}} \quad [V; \%]. \quad (5.23)$$



Výraz  $\nu^2 \cdot 10^{-4}$  ve jmenovateli lze pro malá  $\nu$  (a to je náš případ,  $\nu \leq 3\%$ ) proti číslu 1 zanedbat (bez většího ovlivnění výsledku) a obdržíme

$$\frac{U_2^k}{U_2} = 1 + \nu \cdot 10^{-2} \quad [\text{V}; \%]. \quad (5.24)$$

Chyba napětí nekorigovaného transformátoru v procentním vyjádření je dána vztahem

$$\varepsilon_u = \frac{U_2 k_u - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad [\%; \text{V}, -, \%] \quad (5.25)$$

Vztah (5.24) upravíme na (5.26) a (5.25) postupně na (5.27) a (5.28)

$$U_2^k = (1 + \nu \cdot 10^{-2}) U_2 \quad [\text{V}; \%, \text{V}]. \quad (5.26)$$

$$\frac{U_2 \cdot k_u}{U_1} = 1 + \varepsilon_u \cdot 10^{-2} \quad [\text{V}, -, \%] \quad (5.27)$$

$$U_2 = \frac{(1 + \varepsilon_u \cdot 10^{-2})}{k_u} \cdot U_1 \quad [\text{V}; \%, -, \text{V}] \quad (5.28)$$

Dosazením vztahu (5.28) do vztahu (5.26) za  $U_2$  a postupnou úpravou

$$\frac{U_2^k k_u}{U_1} = (1 + \varepsilon_u \cdot 10^{-2}) \cdot (1 + \nu \cdot 10^{-2}) \quad [\text{V}, -, \%, \%] \quad (5.29)$$

$$\frac{U_2^k k_u}{U_1} = 1 + \varepsilon_u \cdot 10^{-2} + \nu \cdot 10^{-2} + \varepsilon_u \nu \cdot 10^{-4} \quad [\text{V}, -, \%, \%] \quad (5.30)$$

Člen  $\varepsilon_u \nu \cdot 10^{-4}$  lze opět pro malá  $\varepsilon_u$  a  $\nu$  zanedbat a obdržíme

$$\frac{U_2^k k_u}{U_1} = 1 + (\varepsilon_u + \nu) \cdot 10^{-2} \quad [\text{V}, -, \%, \%]. \quad (5.31)$$

Úpravou

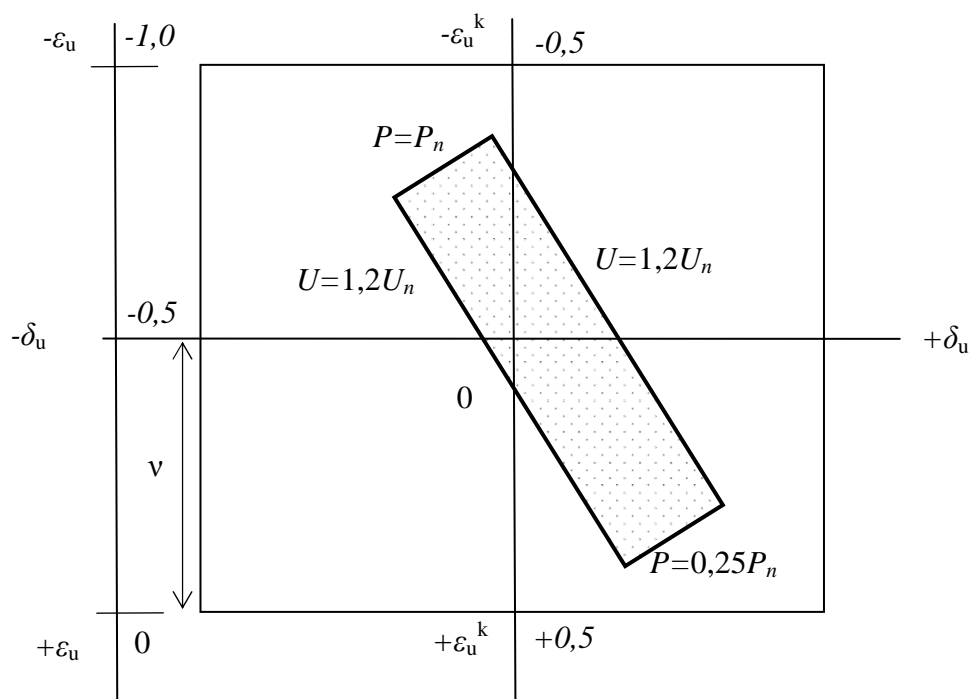
$$\frac{U_2^k k_u - U_1}{U_1} = (\varepsilon_u + \nu) \cdot 10^{-2} \quad [\text{V}, -, \%, \%], \quad (5.32)$$

$$\frac{U_2^k k_u - U_1}{U_1} \cdot 100 = \varepsilon_u + \nu \quad [\text{V}, -, \%, \%]. \quad (5.33)$$

Výraz na levé straně má tvar vyjadřující procentní chybu napětí korigovaného transformátoru a můžeme tedy poslední vztah napsat ve tvaru

$$\varepsilon_u^k = \varepsilon_u + \nu \quad [\%; \%, \%] \quad (5.34)$$

to znamená počátek stupnice  $\varepsilon_u^k$  se posune v komplexním diagramu chyb o hodnotu  $\nu$  směrem nahoru obr. 5-2, v diagramu  $\varepsilon_u = f(U)$  a  $\varepsilon_u = f(P)$  o hodnotu  $\nu$  směrem dolů nebo se v nich o tuto hodnotu posunou pole skutečných chyb směrem nahoru a stupnice  $\varepsilon_u$  se ponechá beze změny.



Obr. 5-2 Komplexní diagram chyb korigovaného a nekorigovaného transformátoru napětí

Chyba napětí  $\varepsilon_u$  nekorigovaného transformátoru leží vždy v záporné oblasti komplexního diagramu chyb, závitovou korekcí se přesouvá směrem do kladné oblasti.

V běžné praxi se chybou napětí rozumí chyba napětí po korekci transformátoru a značí se jen  $\varepsilon_u$  místo  $\varepsilon_u^k$ . Chyba úhlu  $\delta_u$  se při korekci nemění.

### 5.3 Výpočet průchozí impedance a jejich složek z komplexního diagramu chyb

Z komplexního diagramu chyb můžeme určit průchozí impedanci případně její složky. To potřebujeme například při přepočítávání odporu vinutí tak, aby transformátor vyhovoval jiné třídě přesnosti.

Úbytek na průchozím odporu pro zátěž  $P_B$  vyjádřený v % (obr. 5-3)

$$\varepsilon_{RB} = \frac{R I_{2B}}{U_2} \cdot 100 \quad [%; \Omega, A, V] \quad (5.35)$$

Sekundární proud

$$I_{2B} = \frac{P_B}{U_2} \quad [A; VA, V] \quad (5.36)$$

Potom

$$\varepsilon_{RB} = R \frac{P_B}{U_2^2} \cdot 100 \quad [%; \Omega, VA, V] \quad (5.37)$$

Obdobně pro zátěž v bodě C ( $0,25 \cdot P_n$ )

$$\varepsilon_{RC} = R \frac{P_C}{U_2^2} \cdot 100 \quad [\%; \Omega, \text{VA}, \text{V}] \quad (5.38)$$

Rozdíl obou úbytků napětí

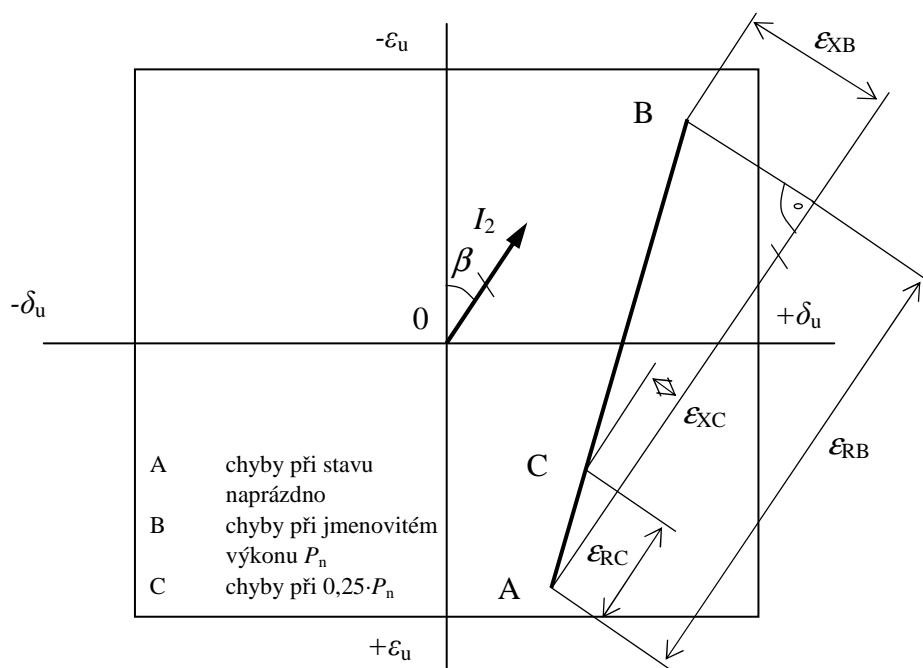
$$\varepsilon_{RB} - \varepsilon_{RC} = R \frac{100}{U_2^2} \cdot (P_B - P_C) \quad [\%; \Omega, \text{VA}, \text{V}] \quad (5.39)$$

Tento rozdíl můžeme lehce odečíst z komplexního diagramu. Pak průchozí odpor

$$R = \frac{\varepsilon_{RB} - \varepsilon_{RC}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{P_B - P_C} \quad [\Omega; \%, \text{V}, \text{VA}] \quad (5.40)$$

Podobně průchozí reaktance

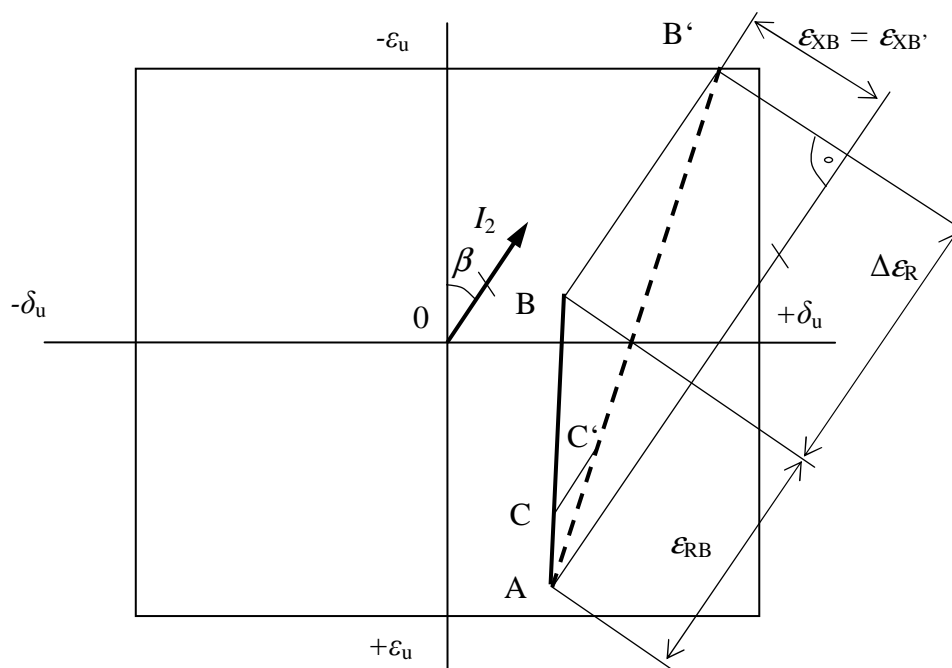
$$X = \frac{\varepsilon_{XB} - \varepsilon_{XC}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{P_B - P_C} \quad [\Omega; \%, \text{V}, \text{VA}] \quad (5.41)$$



Obr. 5-3 Úbytky průchozí impedance v komplexním diagramu

Z komplexního diagramu chyb transformátoru napětí získáme přehled o využití dovoleného pole chyb v dané třídě přesnosti. Jak si ukážeme dále, můžeme také pomocí komplexního diagramu chyb snadno určit odpor vedení, kterým můžeme danou zátěž připojit na svorky transformátoru. Toto je důležité např. v rozvodnách a v místech, kde je zátěž ve větší vzdálenosti od transformátoru.

Pro tento výpočet budeme předpokládat, že vedení má pouze činný odpor a že se tedy v komplexním diagramu zvětší jen složka  $\varepsilon_R$ .



Obr. 5-4 Změna složky  $\varepsilon_R$  při započítání činného odporu vedení

Pro zátěž odpovídající např. bodu B se bude moci teoreticky zvětšit složka  $\varepsilon_{RB}$  až na hodnotu  $\varepsilon_{RB'}$  a bod B se pak posune do bodu B'. Dovolенý úbytek, který se vlastně přičítá k úbytku na průchozím odporu, bude tedy  $\Delta\varepsilon_R$  (obr. 5-4).

Platí

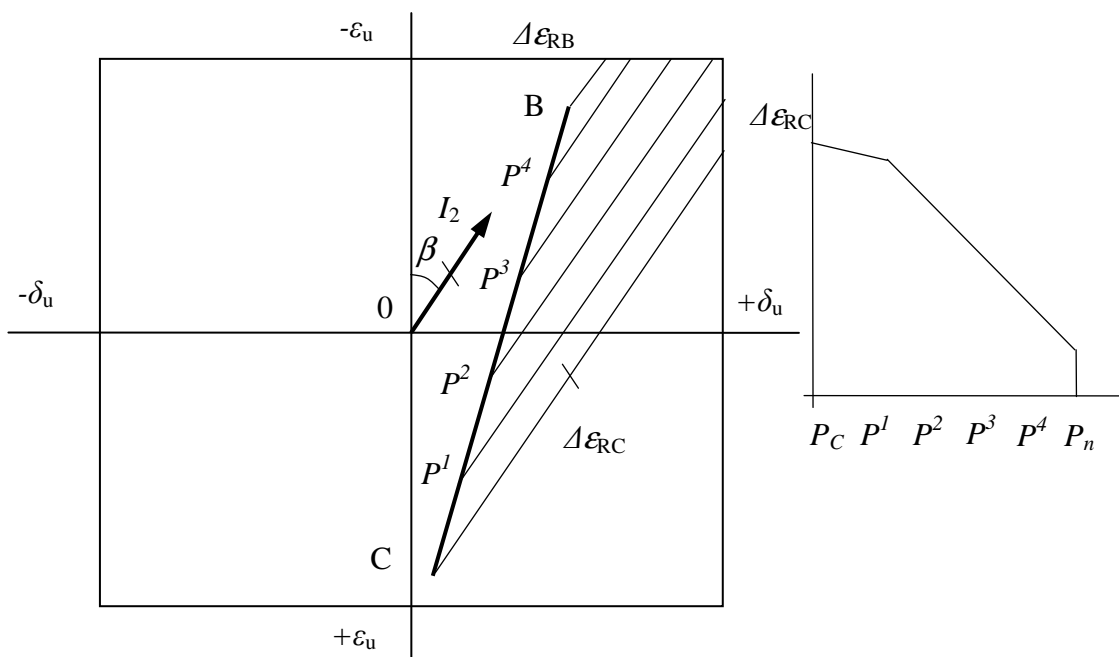
$$\varepsilon_{RB'} = \varepsilon_{RB} + \Delta\varepsilon_R \quad [\%; \%] \quad (5.42)$$

kde  $\Delta\varepsilon_R$  odečteme v % z komplexního diagramu. Pro odpor připojovacího vodiče pak platí

$$R_V = \frac{\Delta\varepsilon_R U_2^2}{100 \cdot P_B} \quad [\Omega; \%, V, VA] \quad (5.43)$$

Při odečítání velikosti  $\Delta\varepsilon_R$  je třeba uvažovat jistou rezervu v chybách, vzhledem k určitému rozptylu v měření chyb.

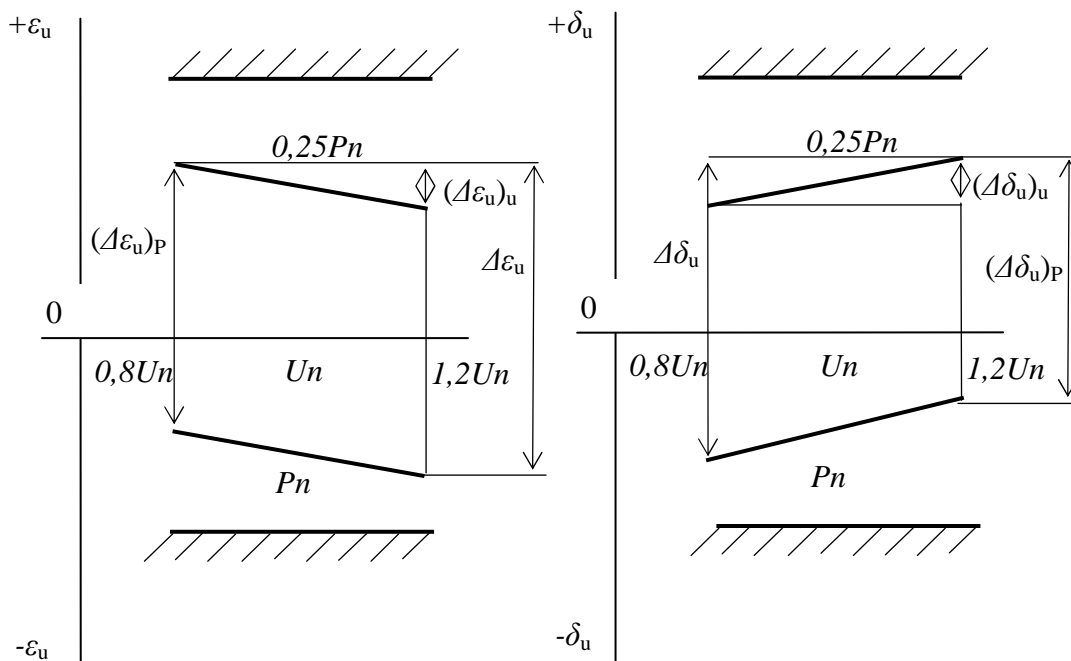
Pro ostatní zátěže si určíme dovolené úbytky  $\Delta\varepsilon_R$  podle obr. 5-5. Z těchto úbytků můžeme vynést i závislost  $\Delta\varepsilon_R = f(P)$ .



Obr. 5-5 Dovolené úbytky  $\Delta\epsilon_R$  v závislosti na zátěži  $P$

## 5.4 Rozpětí chyb

Celkové rozpětí chyb značíme obecně  $\Delta\epsilon_u$  a  $\Delta\delta_u$ . Pokud uvažujeme rozpětí chyb podle určitého parametru, pak připojíme příslušný index podle zátěže  $(\Delta\epsilon_u)_P$ , podle napětí  $(\Delta\epsilon_u)_u$ . Podobně je tomu u rozpětí chyby úhlu obr. 5-6.



Obr. 5-6 Rozpětí chyb



## 6 MAGNETICKÉ MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NAPĚTÍ

### 6.1 Magnetické materiály

Magneticky měkké materiály

Obecné použití magneticky měkkých materiálů je na obvody se střídavou magnetizací, kde vyžadujeme snadné zmagnetování i odmagnetování. Tomu odpovídají transformátory.

Mezi jejich vlastností patří velká počáteční i maximální permeabilita, malá koercitivita, co největší indukce nasycení, co nejmenší magnetické ztráty, co nejdokonalější struktura, strmá křivka prvotní magnetizace, úzká hysterézní smyčka.

Základní složkou magneticky měkkých materiálů je železo (Fe). Z velmi čistého železa se vyrábějí práškové materiály Supermalloy.

Nejpoužívanějšími skupinami magneticky měkkých materiálů jsou železo, nízkouhlíkové oceli (max 0,05 % C), slitiny Fe-Si, Fe-Ni (permalloye), Fe-Co, ferity, slinované kovové prášky, amorfni slitiny.

Pro stavbu magnetických obvodů transformátorů jsou velice vhodné elektrotechnické (křemíkové) oceli Fe-Si s obsahem křemíku 3,2 % až 4,6 % pro transformátorové plechy, menší obsahy křemíku jsou pak užívány u dynamových plechů.

Niklové a kobaltové slitiny se pro napěťové transformátory nepoužívají.

Slitiny Fe-Ni – Permalloye (PY) obsah niklu od 30% do 81%. Např. Fe78Ni (PY78) – magnetické systémy měřících přístrojů, Fe50Ni (PY50) a Fe36Ni (PY36) – pulzní transformátory. Niklové slitiny mají nižší sycení.

Slitiny Fe-Co – obtížné na zpracování, zlepšuje se přidávkou V, Cr. Např. Permendur CV49 (49Co49Fe2V) – speciální transformátory, elektromagnety.

### 6.2 Zpracování plechů a pásů

Velkou změnou bylo ve druhé polovině 30. let objevení průmyslové výroby za studena válcovaných pásů s Gossovou texturou, u nichž se směr snadného magnetování shodoval se směrem válcování.

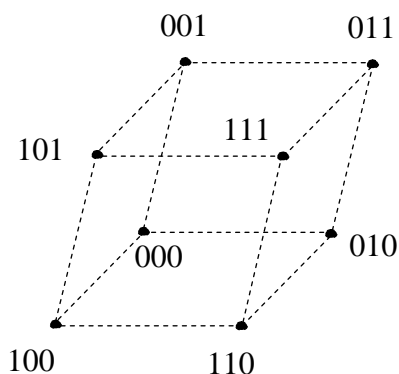
Plechů a pásů se zpracovávají za tepla nebo za studena:

- válcované za tepla (Et)
- válcované za studena neorientované (Ei)
- válcované za studena orientované (Eo)

### 6.3 Textura pásů křemíkových ocelí

Křemíkové ocelové pásy se vyrábějí ve dvou základních texturách Gossově a kubické. Jde o orientaci krystalů vzhledem ke směru válcování. Krystalová mřížka s indexy je znázorněna na obr. 6-1.

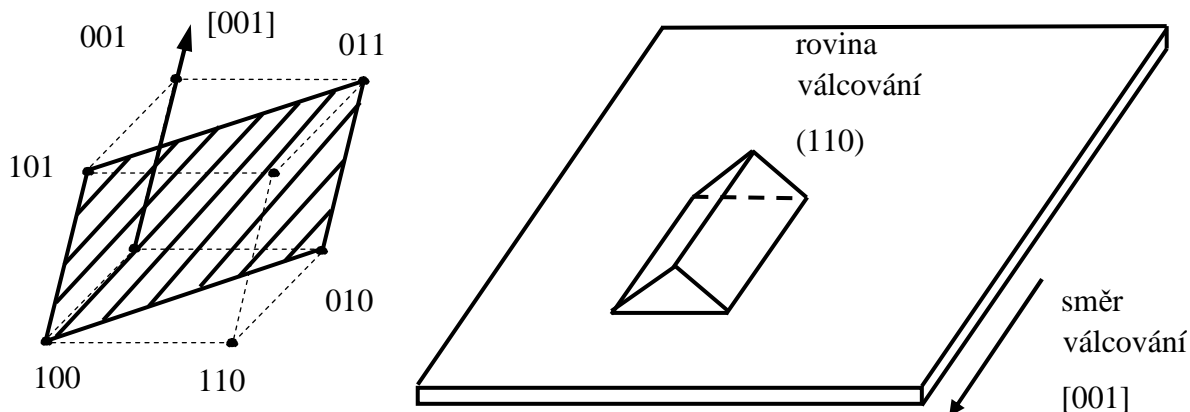




Obr. 6-1 Krystalová mřížka s indexy

### 6.3.1 Gossova textura

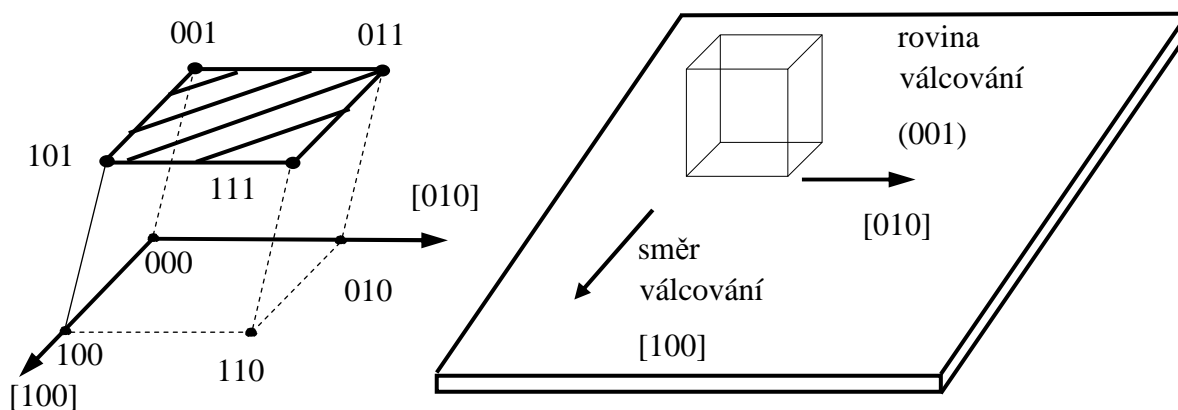
Hrany krystalu jsou převážně rovnoběžné se směrem válcování. Osa snadné magnetizace je shodná se směrem válcování. Tato textura se používá pro válcování pásů pro transformátory.



Obr. 6-2 Gossova textura

### 6.3.2 Kubická textura

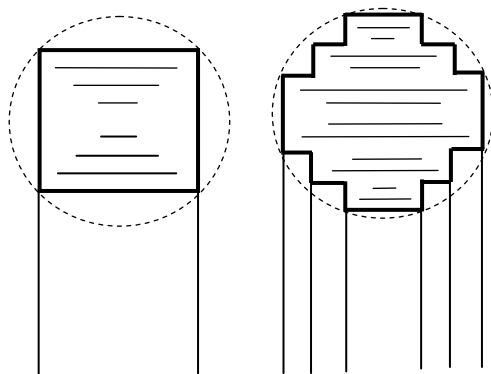
Jedna hrana krystalu je převážně ve směru válcování, druhá hrana je převážně ve směru kolmém ke směru válcování. Umožňuje dva směry snadné magnetizace. Tato textura se používá pro válcování pásů pro letecké generátory.



Obr. 6-3 Kubická textura

## 6.4 Jádra magnetických obvodů

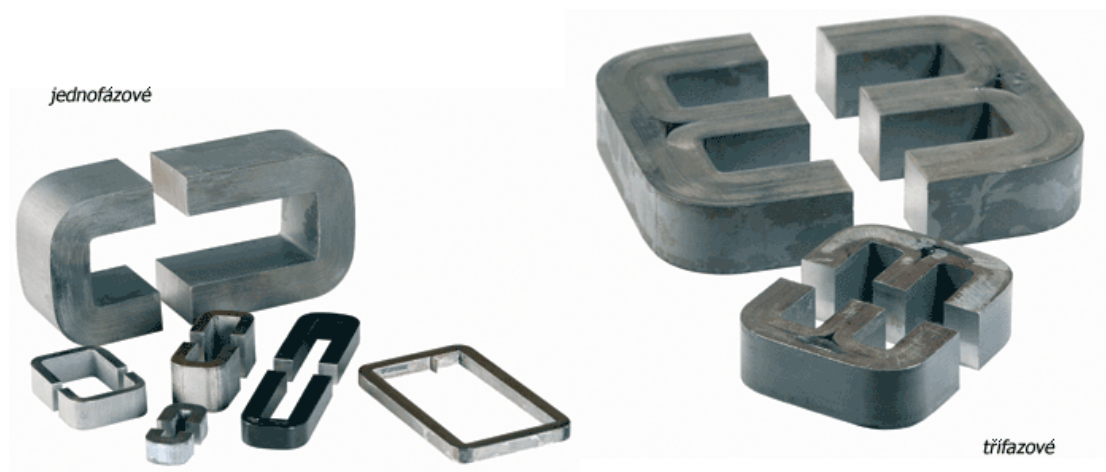
Jádra magnetických obvodů jsou velmi důležitou součástí pro výrobu transformátorů a na jejich jakosti závisí výsledné parametry magnetického obvodu. Jádro transformátorů tvoří magnetický obvod, jehož magnetický indukční tok, vyvolaný průchodem proudu primárním vinutím, indukuje elektrické napětí v sekundárním vinutí.



Vinutá transformátorová jádra se používají jako celistvá jádra (toroidy) nebo jako dělená jádra. Dělená jádra mají pro menší průřezy tvar čtvercový, u větších průřezů tvar odstupňovaný, jak je znázorněno na obr. 6-4.

Jádra magnetických obvodů se vyrábí z orientovaného transformátorového pásu s Gossovou texturou jehož ocel je legována přibližně 3 % křemíku. Rozsah tlouštěk pásů je 0,23 až 0,35 mm.

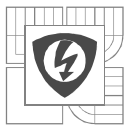
Obr. 6-4 Průřezy čtvercovým a stupňovitým jádrem



Obr. 6-5 Příklady dělených jader jednofázových a trojfázových



Obr. 6-6 Příklady stupňovitých dělených jader



Dělené transformátorové jádro se vyrábí navíjením transformátorové pásky odstupňovaných šířek na rotující formovací elementy, posléze rozřezáním tepelně zpracovaného a syntetickou pryskyřicí slepeného jádra.

Dělená jádra se stupňovaným průřezem, vlastní tvar lépe přizpůsobený průběhu magnetického indukčního toku a lépe využívají speciální strukturu zrna materiálu ve srovnání s jádru, která se skládají z plechových výseků různých tvarů. Speciální průřez těchto jader umožňuje plnější využití průřezu kruhových cívek.

Díky přednostem této konstrukce získáváme úspory v:

- elektrické energii z důvodu nízkých měrných wattových ztrát,
- množství mědi použité pro vinutí, z důvodu menších rozměrů a hmotnosti jader,
- nákladů práce vynaložené při sestavování transformátorů, díky jednoduchosti montáže,
- lepší využití prostoru cívek, díky odstupňovanému průřezu,
- snadnější navíjení drátu na kruhovou cívku.

Jádro se skládá ze dvou částí ve tvaru podkovy. Aby bylo zabezpečeno jejich správné sestavení, mají obě části na jedné společné čelní straně barevnou polohovou značku. Barva polohové značky udává zároveň tloušťku pásu, ze kterého je jádro navinuto.



## 7 TEORETICKÝ POSTUP VÝPOČTU TRANSFORMÁTORU

Výpočet transformátoru napětí se blíží svým charakterem výpočtu klasického transformátoru. Jeho úbytky (napětí nakrátko) jsou však vzhledem k požadované přesnosti menší a také využití magnetického materiálu je nižší, protože magnetická indukce má menší hodnoty než u klasického transformátoru. Pro dvoupólově izolované transformátory napětí bývá hodnota magnetické indukce maximálně 1 T. U jednopólově izolovaných transformátorů musíme tuto indukci volit tak, aby při poruchovém stavu, kdy je vlastně transformátor připojen na sdružené napětí, nedošlo k velkému nárůstu hodnoty magnetické indukce. V důsledku toho by pak mohl budící proud dosáhnout takové hodnoty, která by vedla k tepelnému ohrožení primárního vinutí.

### 7.1 Návrh průřezu jádra

Při našem výpočtu vyjdeme ze zvolené hodnoty počtu závitů na 1 V, která bývá 1,5 až 3. Podle této hodnoty se pak řídí poměr mezi hmotnostmi magnetického obvodu a vinutí u navrhovaného transformátoru. V této volbě se tedy mohou projevit i ekonomická hlediska při výrobě transformátoru.

Nejprve tedy určíme průřez železa  $S_j$  bez zohlednění činitele plnění

$$S_j = \frac{1}{4,44 f B_n N_e} \quad [\text{m}^2; \text{Hz}, \text{T}, \text{V}^{-1}] \quad (7.1)$$

kde  $N_e$  je počet závitů na 1 V a

$B_n$  je hodnota jmenovité magnetické indukce

Průřez železa s uvažováním činitele plnění, který volíme stejně jako u ostatních transformátorů ( $\xi = 0,9$  až  $0,95$ )

$$S = \frac{S_j}{\xi} \quad [\text{m}^2; \text{m}^2] \quad (7.2)$$

Po výpočtu průřezu magnetického obvodu určíme jeho tvar a rozměry. U menších průřezů volíme tvar čtvercový, u větších průřezů tvar odstupňovaný.

### 7.2 Návrh průřezu pouzdra sekundárního vinutí

Po navržení průřezu jádra magnetického obvodu stanovíme průměr opsané kružnice odměřením nebo výpočtem z úhlopříčky čtvercového nebo obdélníkového jádra, případně nejdelší úhlopříčky odstupňovaného jádra  $D_{o2}$ .

Po přičtení nezbytné vůle (0,5 až 2 mm) dostaneme vnitřní průměr pouzdra sekundárního vinutí  $D_{m2}$

$$D_{m2} = D_{o2} + (0,5 \text{ až } 2 \text{ mm}) \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}]. \quad (7.3)$$

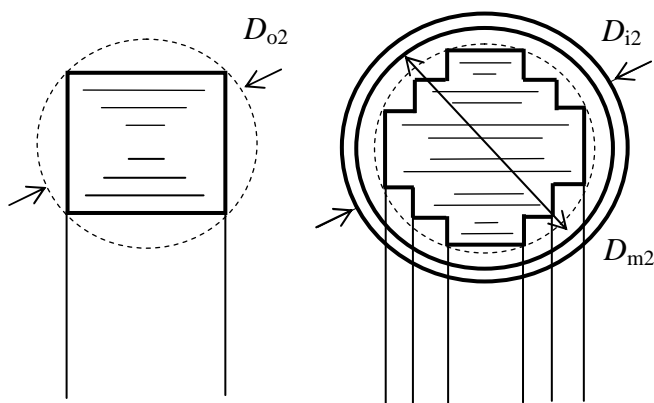
Pouzdro volíme většinou kruhové, pouze pro nízké napětí můžeme použít pouzder čtvercových případně obdélníkových.



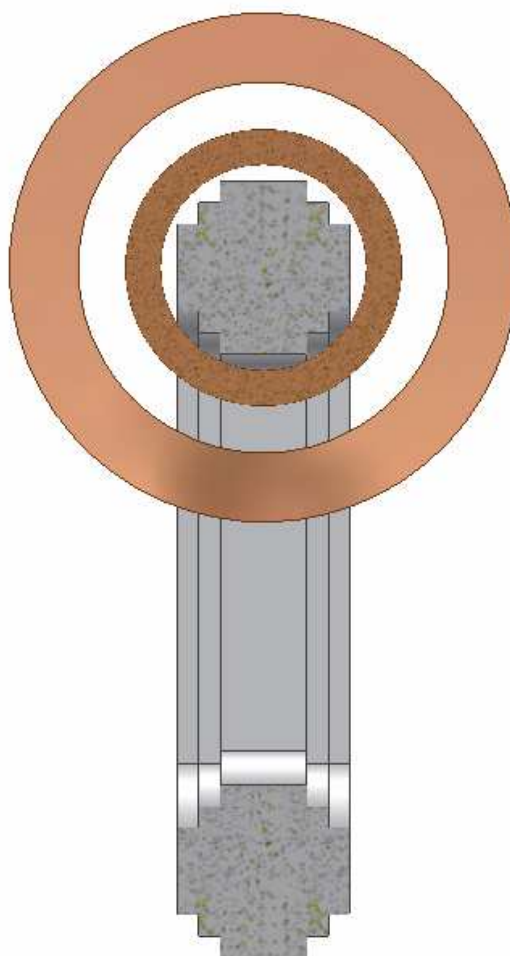
Po přičtení dvojnásobku tloušťky pouzdra sekundárního vinutí dostaneme vnitřní průměr sekundárního vinutí  $D_{i2}$

$$D_{i2} = D_{m2} + 2 t_2 \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (7.4)$$

Na obr. 7-1 jsou znázorněny možné průřezy jádra, kružnice opsaná k průřezu jádra a rozměry průřezu trubkového pouzdra.



Obr. 7-1 Stanovení tvaru průřezu jádra a průměrů trubkového pouzdra



Obr. 7-2 Znázornění tvaru průřezu jádra a obou vinutí v programu INVENTOR



### 7.3 Návrh počtu závitů primárního a sekundárního vinutí

Na základě zvoleného počtu závitů na 1 V stanovíme celkový počet závitů pro jednotlivá vinutí.

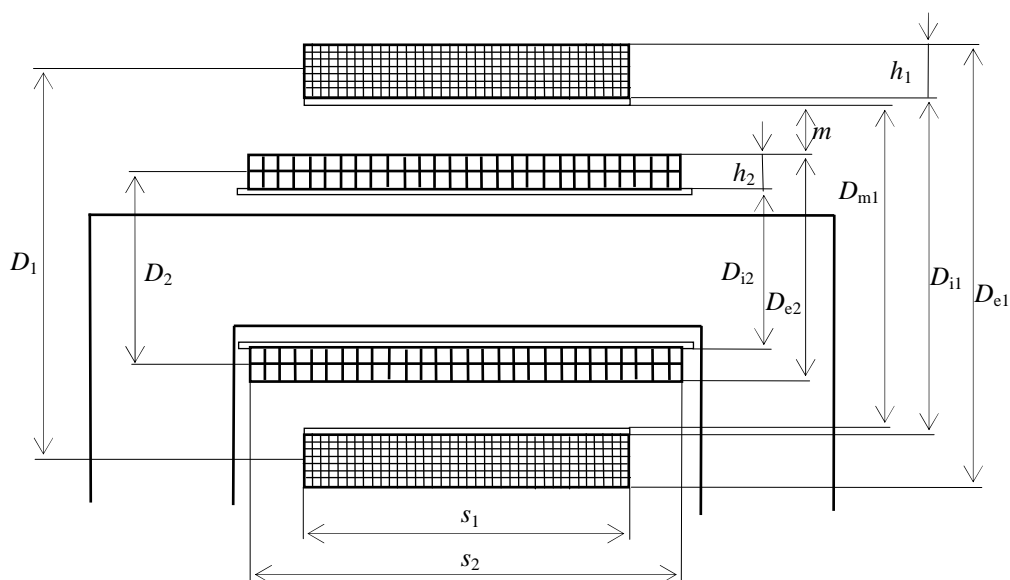
Počet závitů primárního vinutí

$$N_1 = U_{1n} N_e \quad [-; V, V^{-1}] \quad (7.5)$$

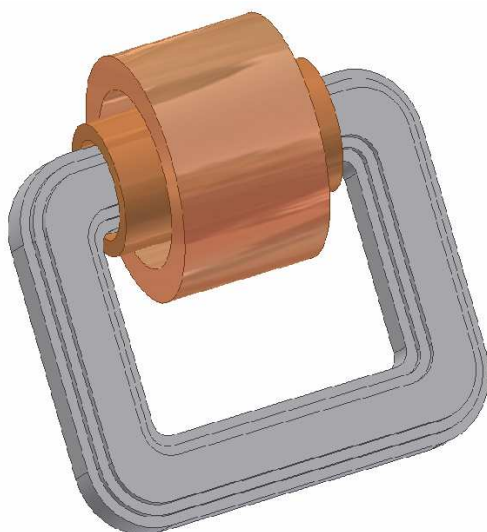
Počet závitů sekundárního vinutí

$$N_2 = U_{2n} N_e \quad [-; V, V^{-1}] \quad (7.6)$$

Z hlediska uspořádání transformátoru předpokládáme, že se bude jednat o provedení s magnetickým obvodem na potenciálu země. Na magnetickém obvodu je nasunuto vinutí sekundární a vně tohoto vinutí pak vinutí primární. Příklad takového uspořádání vinutí pro dvoupólově izolovaný transformátor je na obr. 7-3.



Obr. 7-3 Charakteristické rozměry primárního a sekundárního vinutí

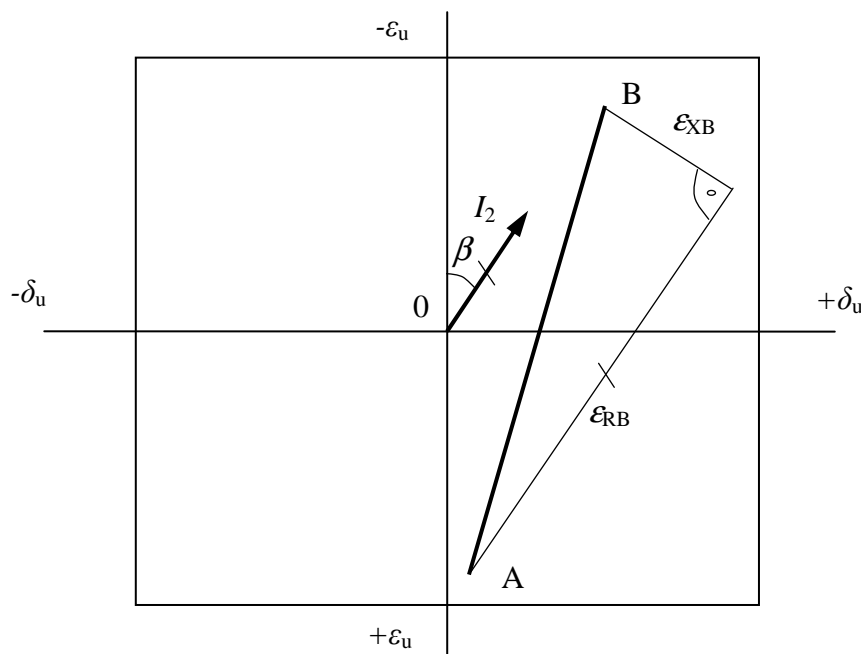


Obr. 7-4 Znázornění jádra a obou vinutí v 3D v programu INVENTOR



## 7.4 Návrh odporu primárního a sekundárního vinutí

Dále navrhujeme obě vinutí tak, aby byly splněny požadavky třídy přesnosti. Budeme vycházet z dovoleného pole chyb navrhovaného transformátoru obr. 7-5.



Obr. 7-5 Komplexní diagram chyb pro určení průchozího odporu

Směr úbytku napětí na průchozím odporu je dán směrem fázoru  $I_2$ . Poměr úbytků  $\varepsilon_{XB}$  a  $\varepsilon_{RB}$  odhadneme podle naměřených hodnot chyb napětí a úhlu u transformátoru napětí s podobně uspořádaným primárním a sekundárním vinutím. Bod A představuje bod naprázdno a bod B odpovídá jmenovité zátěži.

Na základě předběžně odhadnuté hodnoty  $\varepsilon_{RB}$  v % z diagramu obr. 7-5 můžeme vypočítat největší možný průchozí odpor

$$R = \frac{U_{2n}^2 \varepsilon_{RB}}{100 \cdot P_B} \quad [\Omega; V, \%, VA] \quad (7.7)$$

kde  $U_{2n}$  je jmenovité sekundární napětí a

$P_B$  je výkon (zátěž) sekundárního vinutí (zpravidla jmenovitý).

Tento odpor přibližně rozdělíme na obě vinutí. Přitom předpokládáme, že přepočtený odpor primárního vinutí může být až dvojnásobný oproti odporu sekundárního vinutí. Tedy

$$R'_1 = 2 R_2 = \frac{2}{3} R \quad [\Omega; \Omega] \quad (7.8)$$

vztah (7.8) upravíme pomocí vztahu (3.12) pro přepočet odporu primárního vinutí na počet závitů sekundárního vinutí a dostaneme

$$R_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 2 R_2 \quad [\Omega; \Omega] \quad (7.9)$$



Z tohoto vztahu můžeme stanovit velikost odporu obou vinutí.

## 7.5 Návrh sekundárního vinutí

Nejprve navrhujeme sekundární vinutí (je umístěno uvnitř primárního), odhadneme jeho výšku a vypočteme střední průměr  $D_2$  a vnější průměr  $D_{e2}$  sekundárního vinutí. Výšku vinutí uvažujeme maximálně  $h_2 = 5$  až 8 mm.

$$D_2 = D_{i2} + h_2 \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (7.10)$$

$$D_{e2} = D_{i2} + 2 h_2 \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (7.11)$$

Dále vypočteme střední délku závitů vodiče sekundárního vinutí

$$l_2 = \pi D_2 \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (7.12)$$

a délku vodiče pro sekundární vinutí

$$L_2 = l_2 N_2 \quad [\text{mm}; \text{mm}, -] \quad (7.13)$$

Průřez vodiče vypočteme ze vztahu

$$S_2 = \frac{\rho}{R_2} N_2 \pi D_2 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}^2; \Omega \cdot \text{m}, \Omega, -, \text{mm}] \quad (7.14)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor materiálu vinutí  $\rho = 1,724 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ .

Nyní předběžně uspořádáme sekundární vinutí tak, aby vešlo do 2 až 4 poloh (definitivní uspořádání provedeme až po návrhu primáru).

Před návrhem primárního vinutí nejprve vyšetříme izolační předěl mezi oběma vinutími. Předpokládáme zalití transformátoru do epoxidové pryskyřice. Výpočtem a praktickými zkušenostmi byly ověřeny následující hodnoty :

pro krajní napětí	12 kV	9 až 10 mm
	25 kV	16 až 18 mm
	37 kV	25 mm

U námi řešeného transformátoru 12 kV tedy volíme  $m = 10$  mm .

## 7.6 Návrh primárního vinutí

Nyní můžeme určit vnitřní průměr pouzdra primáru  $D_{m1}$

$$D_{m1} = D_{e2} + 2 m \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}]. \quad (7.15)$$

a vnitřní průměr primárního vinutí  $D_{i1}$  (tloušťku pouzdra uvažujeme 1 až 2 mm). Abychom mohli navrhnout průřez primárního vodiče musíme odhadnout výšku vinutí  $h_1$  (volíme ji v rozmezí 10 až 20 mm). Pak střední průměr primárního vinutí  $D_1$

$$D_1 = D_{i1} + h_1 \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (7.16)$$

a vnější průměr vinutí  $D_{e1}$







Z průřezu sekundárního vodiče vypočteme průměr vodiče sekundárního vinutí a zvolíme odpovídající drát z nabídky. Pro sekundární vinutí se volí z těchto průměrů drátů: 1,12; 1,25; 1,4; 1,6 a 2,0 mm.

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 S_2}{\pi}} \quad [\text{mm}; \text{mm}^2]. \quad (7.21)$$

Obdobně spočteme z průřezu primárního vodiče průměr primárního vinutí a zvolíme odpovídající drát z nabídky. Pro primární vinutí se volí z následujících průměrů drátů: 0,1; 0,118; 0,125; 0,14 a 0,16 mm.

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 S_1}{\pi}} \quad [\text{mm}; \text{mm}^2]. \quad (7.22)$$

Potom zesílení se provádí vodičem průměru  $d_z = 0,4$  mm a v některých případech se používá další zesílení vnější vrstvy závitů z 0,4 mm na 0,8 mm.

Na základě zvolených průměrů vodičů vinutí navrhujeme skladbu primárního vinutí a to zejména počet vrstev. Nesmíme zapomenout, že se změní původně zvolená výška vinutí.

## 7.8 Výpočet odporů vinutí

V dalších výpočtech budeme uvažovat za  $d_1$  a  $d_2$  zvolené průměry vodičů závitů, které jsou rozhodující pro výpočet odporu vinutí a zesílení vstupní polohy a vnitřní polohy primárního vinutí nebudeme zohledňovat.

Po návrhu primárního a sekundárního vinutí následuje výpočet odporů vinutí z jejich rozměrů.

$$R_1 = \frac{\rho}{S_1} N_1 \pi D_1 \cdot 10^3 \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{m}, \text{mm}^2, -, \text{mm}], \quad (7.23)$$

dosadíme za  $D_1$  ze vzorce (7.16) a za  $S_1$  po upravení ze vzorce (7.21) a dostaneme

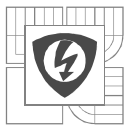
$$R_1 = \frac{\rho}{\frac{\pi d_1^2}{4}} N_1 \pi (D_{i1} + h_1) \cdot 10^3 \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{m}, \text{mm}, -, \text{mm}, \text{mm}], \quad (7.24)$$

$$R_1 = \frac{4 \rho}{d_1^2} N_1 (D_{i1} + h_1) \cdot 10^3 \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{m}, \text{mm}^2, -, \text{mm}], \quad (7.25)$$

přičemž musíme z rozměrů vinutí spočítat výšku vinutí  $h_1$ , kterou jsme z počátku pouze odhadli a také musíme zohlednit povrchovou úpravu vodičů, proto ve výpočtech výšky vinutí zohledníme průměry vodičů s dvojsmaltem a také to, že mezi jednotlivými vrstvami je izolační proklad, máme tedy průměry  $d_{1\max}$ ,  $d_{2\max}$  a  $d_{z\max}$ .

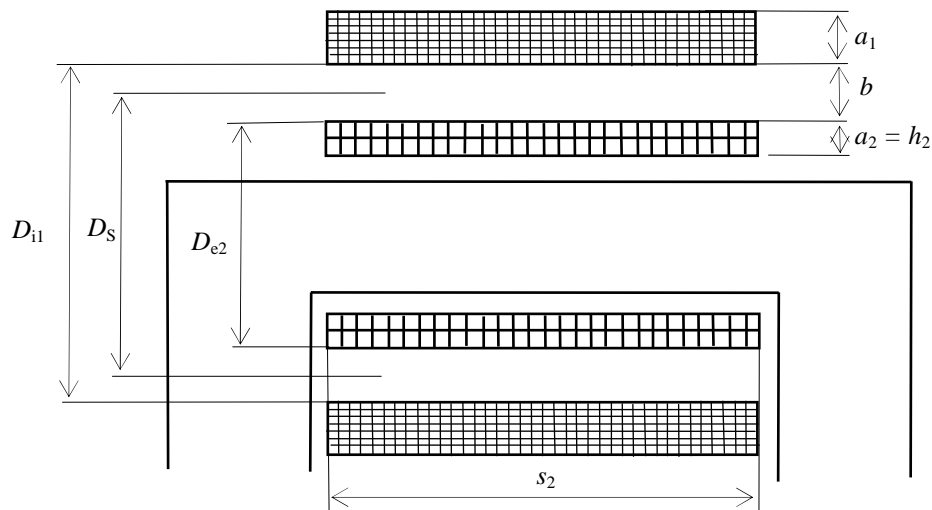
Obdobně spočteme odpor sekundárního vinutí

$$R_2 = \frac{4 \rho}{d_2^2} N_2 (D_{i2} + h_2) \cdot 10^3 \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{m}, \text{mm}^2, -, \text{mm}], \quad (7.26)$$



## 7.9 Výpočet rozptylové reaktance

Abychom při výpočtu rozptylové reaktance mohli postupovat stejným způsobem jako u běžných transformátorů plášťových, musíme si graficky překreslit plochu primárního vinutí na stejnou šířku vinutí sekundárního za podmínky zachování stejné plochy primárního vinutí s upravenou výškou primárního vinutí  $a_1$ .



Obr. 7-7 Rozměry upraveného primárního vinutí na šířku sekundárního vinutí

Protože pro  $D_s$  platí

$$D_s = D_{e2} + b \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (7.27)$$

dále z obrázku (7.7) platí

$$b = \frac{D_{i1} - D_{e2}}{2} \quad [\text{mm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (7.28)$$

pak pro rozptylovou reaktanci vztaženou na sekundární vinutí platí ([1] str. 66)

$$X_r = 4 \cdot 10^{-7} \frac{\pi (D_{e2} + D_{i2})}{2 s_2} \cdot N_2^2 \left( \frac{D_{i1} - D_{e2}}{2} + \frac{a_1 + h_2}{3} \right) [\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^{-1}, \text{mm}, -, \text{mm}] \quad (7.29)$$

$$\text{kde konstanta ve vztahu má jednotky } \left[ \frac{\text{Hz} \cdot \text{H}}{\text{mm}} = \frac{\text{H}}{\text{s} \cdot \text{mm}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{A}} = \frac{\text{V}}{\text{mm} \cdot \text{A}} = \frac{\Omega}{\text{mm}} \right].$$

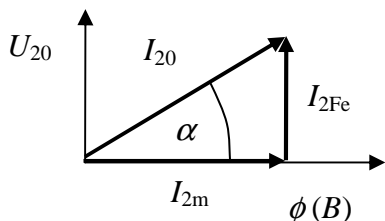
Dále dopočítáme složky průchozí reaktance, pro které platí vztah (5.12) a budeme uvažovat vztah mezi složkami  $X_1' = X_2$   $[\Omega; \Omega]$

$$X_2 = X_1' = X_r \quad [\Omega; \Omega] \quad (7.30)$$

Potom pro reaktanci primárního vinutí  $X_1$  platí

$$X_1 = X_1' \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad [\Omega; \Omega, -] \quad (7.31)$$

## 7.10 Výpočet proudu naprázdno a jeho složek



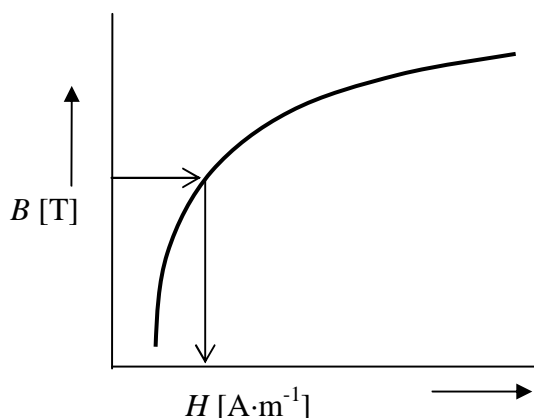
Při výpočtu proudu naprázdno  $I_{20}$  a jeho složek  $I_{2Fe}$  a  $I_{2m}$  budeme postupovat stejným způsobem jako u běžných transformátorů.

Platí

$$\overline{I_{20}} = \overline{I_{2m}} + \overline{I_{2Fe}} \quad [\text{A}; \text{A}] \quad (7.32)$$

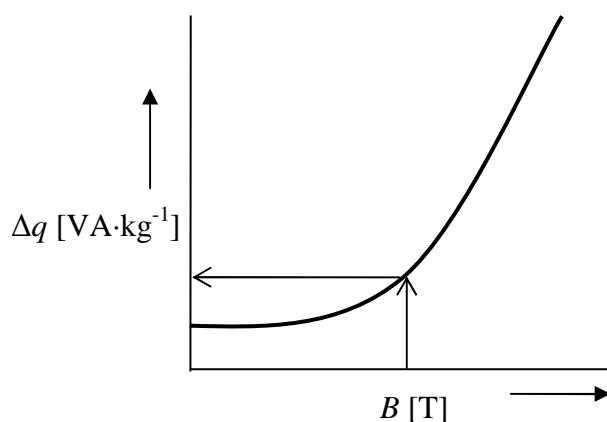
$$I_{20} = \sqrt{I_{2Fe}^2 + I_{2m}^2} \quad [\text{A}; \text{A}] \quad (7.33)$$

$$\sin \alpha = \frac{I_{2Fe}}{I_{20}} \quad [^\circ; \text{A}]; \quad \cos \alpha = \frac{I_{2m}}{I_{20}} \quad [^\circ; \text{A}] \quad (7.34, 7.35)$$

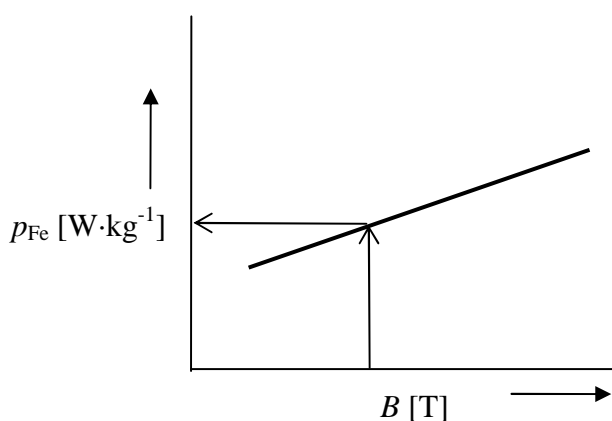


Obr. 7-8 Magnetizační charakteristika

K výpočtu proudu naprázdno využijeme magnetizační charakteristiku použitého magnetického materiálu (obr. 7-8) nebo závislosti měrného magnetizačního příkonu na magnetické indukci (obr. 7-9) a závislosti měrných magnetizačních ztrát na magnetické indukci. (obr. 7-10)



Obr. 7-9 Závislost měrného magnetizačního příkonu na magnetické indukci



Obr. 7-10 Závislost měrných magnetizačních ztrát na magnetické indukci

Z rozměrů a hmotnosti celého magnetického obvodu můžeme vypočítat celkový magnetizační příkon a celkové magnetizační ztráty. Celkový magnetizační příkon je dán výrazem

$$m_{Fe} \Delta q = I_{2m} U_2 \quad [\text{kg}, \text{VA} \cdot \text{kg}^{-1}; \text{A}, \text{V}] \quad (7.36)$$

kde  $m_{Fe}$  je hmotnost magnetického obvodu

$\Delta q$  měrný magnetizační příkon



Magnetizační proud pak je

$$I_{2m} = \frac{m_{Fe} \Delta q}{U_2} \quad [\text{A}; \text{kg}, \text{VA} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{V}] \quad (7.37)$$

V případě, že je dána pouze magnetizační charakteristika  $B = f(H)$ , vypočteme magnetizační proud ze vztahu

$$H l_m = N_2 \sqrt{2} I_{2m} = \sqrt{2} H_{ef} l_m \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}; -, \text{A}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (7.38)$$

kde  $H$  je intenzita magnetického pole  
 $l_m$  je délka střední siločáry magnetického pole  
 $H_{ef}$  je efektivní hodnota intenzity magnetického pole

$$I_{2m} = \frac{H_{ef} l_m}{N_2} \quad [\text{A}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}, -] \quad (7.39)$$

Celkové činné ztráty v magnetickém obvodu vypočteme pomocí závislosti měrných magnetizačních ztrát na magnetické indukci. Podobně jako při výpočtu magnetizačního příkonu platí

$$P_{Fe} = k m_{Fe} p_{Fe} \quad [\text{W}, \text{kg}; \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7.40)$$

kde  $k = 1,05 \div 1,2$  je činitel přídatných ztrát vzniklých skládáním a zpracováním plechů  
 $P_{Fe}$  jsou celkové činné ztráty v magnetickém obvodu  
 $p_{Fe}$  měrné ztráty na jednotku hmotnosti

Odpovídající ztrátový proud pak je

$$I_{2Fe} = \frac{P_{Fe}}{U_{20}} \cong \frac{P_{Fe}}{U_2} \quad [\text{A}; \text{W}, \text{V}] \quad (7.41)$$

Podle kapitoly 5.1 vypočteme chyby pro jednotlivé zátěže, které vyneseme do komplexního diagramu. Po posouzení velikosti chyb zbývá návrh korekce, aby bylo správně využito pole dovolených chyb pro zadanou třídu přesnosti. Závitová korekce je popsána v kapitole 5.2.

## 8 VÝPOČET A NÁVRH ZADANÉHO TRANSFORMÁTORU

Volíme počet závitů na 1 V:  $N_e = 2,25 \text{ V}^{-1}$

Dle vzorce (7.1) vypočítáme průřez železa  $S_j$  bez zohlednění činitele plnění

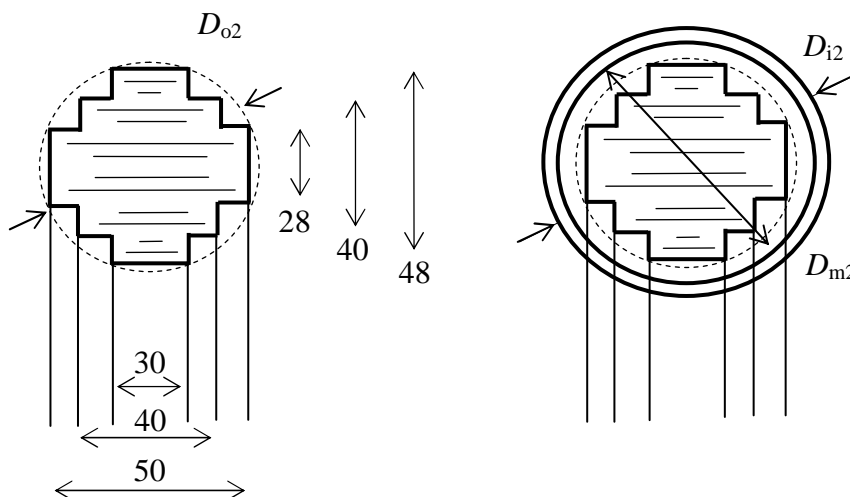
$$S_j = \frac{1}{4,44 f B_n N_e} = \frac{1}{4,44 \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 1 \text{ T} \cdot 2,25 \text{ V}^{-1}} = 0,002 \text{ m}^2 \quad (8.1)$$

Volíme činitel plnění  $\xi$ :  $\xi = 0,95$

Průřez železa s uvažováním činitele plnění potom dle vzorce (7.2) je

$$S = \frac{S_j}{\xi} = \frac{0,002 \text{ m}^2}{0,95} = 0,002107 \text{ m}^2 = 21,07 \text{ cm}^2 \quad (8.2)$$

Pro magnetické jádro volíme odstupňované jádro z plechů šířek 50, 40 a 30 mm.



Obr. 8-1 Rozměry navrženého průřezu jádra

Navržené jádro tedy bude mít průřez

$$S = 28 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm} + 12 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm} + 8 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm} = 2120 \text{ mm}^2 = 21,2 \text{ cm}^2 \quad (8.3)$$

Průřez železa se zohledněním činitele plnění

$$S_{Fe} = S \xi = 21,2 \text{ cm}^2 \cdot 0,95 = 20,14 \text{ cm}^2 = 0,002014 \text{ m}^2 \quad (8.4)$$

V programu Auto CAD jsme si nakreslili navržené jádro i s průřezem s přesnými hodnotami.

Délka střední siločáry  $l_m$  (sečtením délek rovných úseků a připočtením délky kružnice čtyř zaoblených rohů dle radiusu).

$$l_m = 2 \cdot 126 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm} + 2 \cdot \pi \cdot 27 \text{ mm} = 565 \text{ mm} = 0,565 \text{ m} \quad (8.5)$$

z hodnot ze vzorců (8.4) a (8.5) získáme objem železa

$$V_{Fe} = S_{Fe} l_m = 0,002014 \text{ m}^2 \cdot 0,565 \text{ m} = 0,001138 \text{ m}^3 \quad (8.6)$$



a celková hmotnost magnetického obvodu (s ohledem na hustotu materiálu jádra  $\rho_{\text{Fe}} = 7650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$$m_{\text{Fe}} = V_{\text{Fe}} \rho_{\text{Fe}} = 0,001138 \text{ m}^3 \cdot 7650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 8,705 \text{ kg} = 8,7 \text{ kg} \quad (8.7)$$

dále jsme v programu Auto CAD změřili průměr opsané kružnice  $D_{o2} = 57,3 \text{ mm}$ .

Volíme kruhové laminátové pouzdro délky  $l_p = 130 \text{ mm}$  a spočteme potřebný vnitřní průměr pouzdra sekundárního vinutí dle vzorce (7.3)

$$D_{m2} = D_{o2} + (0,5 \text{ až } 2) = 57,3 \text{ mm} + 1,7 \text{ mm} = 59 \text{ mm} \quad (8.8)$$

a vnější průměr pouzdra a současně vnitřní průměr sekundárního vinutí dostaneme po přičtení dvojnásobku tloušťky ( $t_2 = 1,5 \text{ mm}$ ) zvoleného laminátového pouzdra dle vzorce (7.4)

$$D_{i2} = D_{m2} + 2 t_2 = 59 \text{ mm} + 2 \cdot 1,5 \text{ mm} = 62 \text{ mm} \quad (8.9)$$

Nyní stanovíme počty závitů obou vinutí. Počet závitů primárního vinutí dle vzorce (7.5) a počet závitů sekundárního vinutí dle vzorce (7.6)

$$N_1 = U_{1n} N_e = 12000 \text{ V} \cdot 2,25 \text{ V}^{-1} = 27000 \text{ závitů} \quad (8.6)$$

$$N_2 = U_{2n} N_e = 100 \text{ V} \cdot 2,25 \text{ V}^{-1} = 225 \text{ závitů} \quad (8.7)$$

Dále budeme vycházet z dovoleného pole chyb navrhovaného transformátoru a budeme vycházet z hodnot chyb napětí a úhlu u transformátoru napětí s podobně uspořádaným primárním a sekundárním vinutím.

Od výrobce měřících transformátorů, firmy KPB Intra Bučovice, jsme obdrželi naměřené údaje pro napěťový transformátor s podobně uspořádaným vinutím, jako je transformátor podle našeho zadání. Tyto hodnoty jsme zanesli do přehledné tabulky tab. 8-1.

Tab. 8-1 Chyby měřicího transformátoru napětí s podobným uspořádáním od KPB Intra

$U_n [\text{V}]$ $P [\text{VA}]$	80	100	120	
7,5	0.17	0.23	0.25	$\varepsilon_u [\%]$
	8	9	9	$\delta_u [\text{min}]$
30	-0.25	-0.19	-0.17	$\varepsilon_u [\%]$
	8	8	9	$\delta_u [\text{min}]$

Údaje zaneseme v programu Auto CAD do komplexního diagramu, doplníme směr proudu  $I_2$  a znázorníme úbytky  $\varepsilon_{RB}$  a  $\varepsilon_{XB}$ , kdy  $\varepsilon_{RB}$  je rovnoběžné se směrem proudu a  $\varepsilon_{XB}$  je k němu kolmý (obr.8-2 vlevo). Následně jsme graficky odečetli poměr úbytků  $\varepsilon_{RB}$  a  $\varepsilon_{XB}$ .

$$\frac{\varepsilon_{RB}}{\varepsilon_{XB}} = 1 \quad (8.8)$$

Pro námi navrhovaný transformátor napětí jsme navrhli ve stejném poměru úbytky tak, aby byla optimálně využitá oblast dovolených chyb a odečetli jsme  $\varepsilon_{RB} = 0,63 \%$ .

Potom největší možný průchozí odpor dle vzorce (7.7)

$$R = \frac{U_{2n}^2 \varepsilon_{RB}}{100 \cdot P_b} = \frac{100^2 \text{ V} \cdot 0,63 \%}{100 \cdot 30 \text{ VA}} = 2,1 \Omega \quad (8.9)$$

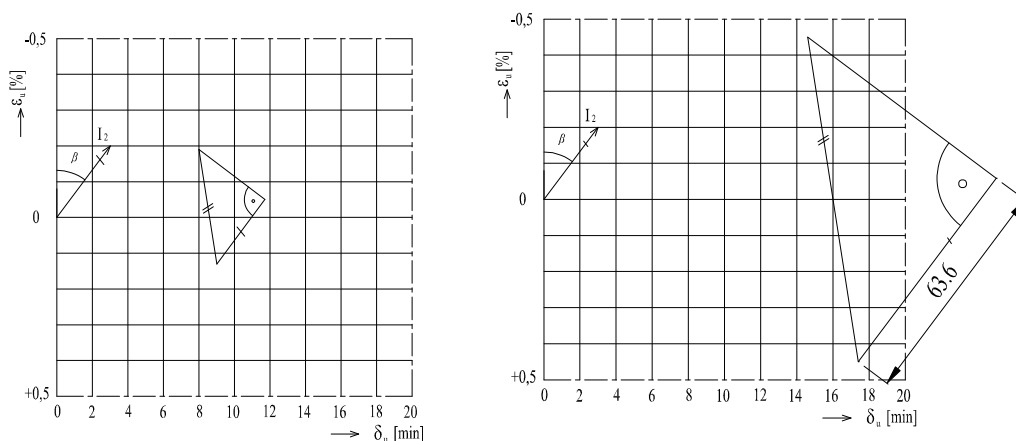
Pro další výpočet rozdělíme průchozí odpor na obě vinutí v poměru dle vzorce (7.8)

$$R'_1 = 2 R_2 = 2 \cdot 0,7 \Omega = 1,4 \Omega \quad (8.10)$$

Tedy pro další výpočty volíme odpor primárního vinutí přepočtený na počet závitů sekundárního vinutí  $R'_1 = 1,4 \Omega$  a odpor sekundárního vinutí  $R_2 = 0,7 \Omega$ .

Ze vztahů (7.9) vypočítáme odpor primárního vinutí

$$R_1 = R'_1 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 1,4 \Omega \cdot \left( \frac{27000}{225} \right)^2 = 20160 \Omega \quad (8.11)$$



Obr. 8-2 Znázornění chyb transformátoru napětí v komplexním diagramu chyb: vlevo chyby od výrobce KPB Intra, vpravo chyby volené pro námi navrhovaný transformátor

Nyní budeme navrhovat sekundární vinutí a započneme odhadem výšky sekundárního vinutí. Za předpokladu, že bude 225 závitů ve 3 vrstvách, předběžné volbě použití drátu s průměrem 1,25 mm a tedy maximálním průměru 1,35 mm a izolační proklad, odhaduji výšku  $h_2 = 5$  mm. Potom střední průměr  $D_2$  a vnější průměr  $D_{e2}$  sekundárního vinutí bude dle vzorců (7.10) a (7.11)

$$D_2 = D_{i2} + h_2 = 62 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 67 \text{ mm} \quad (8.12)$$

$$D_{e2} = D_{i2} + 2 h_2 = 62 \text{ mm} + 2 \cdot 5 \text{ mm} = 72 \text{ mm} \quad (8.13)$$

Střední délka závitu vodiče sekundárního vinutí dle vzorce (7.12)

$$l_2 = \pi D_2 = \pi \cdot 67 \text{ mm} = 210,49 \text{ mm} \quad (8.14)$$

Délka vodiče sekundárního vinutí dle vzorce (7.13)

$$L_2 = l_2 N_2 = 210,49 \text{ mm} \cdot 225 = 47359,51 \text{ mm} = 47,36 \text{ m} \quad (8.15)$$





Průřez vodiče sekundárního vinutí dle vzorce (7.14)

$$S_2 = \frac{\rho}{R_2} N_2 \pi D_2 \cdot 10^3 = \frac{1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}}{0,7 \Omega} \cdot 225 \cdot \pi \cdot 67 \cdot 10^3 = 1,166 \text{ mm}^2 \quad (8.16)$$

Vnitřní průměr pouzdra primáru  $D_{m1}$  dle vzorce (7.15)

$$D_{m1} = D_{e2} + 2 m = 72 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} = 92 \text{ mm} \quad (8.17)$$

Vnitřní průměr primárního vinutí (vnější průměr pouzdra)

$$D_{i1} = D_{m1} + 2 t_1 = 92 \text{ mm} + 2 \cdot 1,5 \text{ mm} = 95 \text{ mm} \quad (8.18)$$

Střední průměr primárního vinutí  $D_1$  dle vzorce (7.16), výšku vinutí odhadujeme (uvažujeme průměr vodiče a tloušťku prokladu mezi polohami vinutí)  $h_1 = 17 \text{ mm}$

$$D_1 = D_{i1} + h_1 = 95 \text{ mm} + 17 \text{ mm} = 112 \text{ mm} \quad (8.19)$$

Vnější průměr primárního vinutí  $D_{e1}$

$$D_{e1} = D_{i1} + 2 h_1 = 95 + 2 \cdot 17 \text{ mm} = 129 \text{ mm} \quad (8.20)$$

Střední délka závitu primárního vodiče

$$l_1 = \pi D_1 = \pi \cdot 112 \text{ mm} = 351,86 \text{ mm} \quad (8.21)$$

Délka vodiče primárního vinutí

$$L_1 = l_1 N_1 = 351,86 \text{ mm} \cdot 27000 = 9500176,18 \text{ mm} = 9500,18 \text{ m} \quad (8.22)$$

Průřez primárního vodiče

$$S_1 = \frac{\rho}{R_1} N_1 \pi D_1 \cdot 10^3 = \frac{1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}}{20160 \Omega} \cdot 27000 \cdot \pi \cdot 112 \cdot 10^3 = 0,00812 \text{ mm}^2 \quad (8.23)$$

Nyní z průřezů sekundárního a primárního vodiče vypočítáme dle (7.21) a (7.22) průměry vodičů pro sekundární a primární vedení a zvolíme vhodné průměry vyráběných drátů

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,166 \text{ mm}^2}{\pi}} = 1,2184 \text{ mm} \Rightarrow \text{volíme drát } 1,25 \text{ mm} \quad (8.24)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00812}{\pi}} = 0,1017 \text{ mm} \Rightarrow \text{volíme drát } 0,1 \text{ mm} \quad (8.25)$$

Zesílené polohy primárního vedení provedeme drátem  $d_z = 0,4 \text{ mm}$ , jde o první polohu na pouzdře primárního vinutí a vnější vstupní polohu.

Nyní podle zvolených průměrů drátů spočteme skutečné parametry sekundárního a primárního vinutí a zaznamenáme do přehledných tabulek tab. 8-2 a tab. 8-3.



Tab. 8-2 Parametry sekundárního vinutí

Sekundární vinutí					
Vodič vinutí	průměr	$d_2$	[mm]	1,25	
	max. průměr se smaltem	$d_{2max}$	[mm]	1,35	
	průřez	$S_2$	[mm <sup>2</sup> ]	1,227	
	střední délka na závit	$l_2$	[mm]	208,29	
	celková délka	$L_2$	[m]	46,86	
Pouzdro vinutí	vnitřní průměr	$D_{m2}$	[mm]	59	
	tloušťka	$t_2$	[mm]	1,5	
	vnější průměr	$D_{i2}$	[mm]	62	
	délka trubky		[mm]	130	
Vinutí	počet závitů	$N_2$	[-]	225	
	počet poloh		[-]	3	
	Rozložení závitů do jednotlivých poloh (76 + 75 + 74)				
	šířka	$s_2$	[mm]	103	
	výška	$h_2$	[mm]	4,3	
	střední průměr	$D_2$	[mm]	66,3	
	vnější průměr	$D_{e2}$	[mm]	70,6	
Proklad mezi polohami	tloušťka		[mm]	0,11	
	šířka		[mm]	115	

Odpor vinutí primáru dle vzorce (7.25)

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{4\rho}{d_1^2} N_1 (D_{i1} + h_1) \cdot 10^3 = \\ &= \frac{4 \cdot 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}}{0,1^2 \text{ mm}^2} \cdot 27000 \cdot (95 \text{ mm} + 16,3 \text{ mm}) \cdot 10^3 = 20723,17 \Omega \end{aligned} \quad (8.26)$$

Odpor vinutí primáru přepočtený na počet závitů sekundáru podle (3.12)

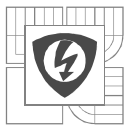
$$R_1' = R_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 20723,17 \cdot \left( \frac{225}{27000} \right)^2 = 1,439 \Omega \quad (8.27)$$

Odpor vinutí sekundáru dle vzorce (7.26)

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{4\rho}{d_2^2} N_2 (D_{i2} + h_2) \cdot 10^3 = \\ &= \frac{4 \cdot 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}}{1,25^2 \text{ mm}^2} \cdot 225 \cdot (62 \text{ mm} + 4,3 \text{ mm}) \cdot 10^3 = 0,658 \Omega \end{aligned} \quad (8.28)$$

Rozptylová reaktance (průchozí reaktance) dle vzorce (7.29), kde přepočítaná výška primárního vinutí  $a_1 = 9,45 \text{ mm}$

$$R = R_1' + R_2 = 1,439 \Omega + 0,658 \Omega = 2,097 \quad (8.29)$$



$$X_r = 4 \cdot 10^{-7} \frac{\pi (D_{e2} + D_{i2})}{2 s_2} \cdot N_2^2 \left( \frac{D_{i1} - D_{e2}}{2} + \frac{a_1 + h_2}{3} \right) =$$
$$= 4 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{mm}^{-1} \frac{\pi (70,6 \text{ mm} + 95 \text{ mm})}{2 \cdot 103 \text{ mm}} \cdot 225^2 \left( \frac{95 \text{ mm} - 70,6 \text{ mm}}{2} + \frac{9,45 \text{ mm} + 4,3 \text{ mm}}{3} \right) =$$
$$= 0,858 \Omega \quad (8.30)$$

Dále dopočítáme průchozí reaktanci a její složky pro které platí vztahy (5.12), (7.30) a (7.31)

$$X_2 = X_1' = X_r = 0,858 \Omega = 0,5 \cdot X \Rightarrow X = 1,716 \Omega \quad (8.31)$$

$$X_1 = X_1' \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 0,858 \Omega \cdot \left( \frac{27000}{225} \right)^2 = 12355,2 \Omega \quad (8.32)$$

Tab. 8-3 Parametry primárního vinutí

Primární vinutí				
Vodič vinutí	průměr	$d_1$	[mm]	0,1
	max. průměr se smaltem	$d_{1\max}$	[mm]	0,127
	průřez	$S_1$	[mm <sup>2</sup> ]	0,00785
	střední délka na závit	$l_1$	[mm]	349,66
	celková délka	$L_1$	[m]	9440,8
Vodič zesílení vstupní a vnitřní polohy	průměr	$d_z$	[mm]	0,4
	max. průměr se smaltem	$d_{z\max}$	[mm]	0,459
Pouzdro vinutí	vnitřní průměr	$D_{m1}$	[mm]	92
	tloušťka	$t_1$	[mm]	1,5
	vnější průměr	$D_1$	[mm]	95
	délka trubky		[mm]	100
Vinutí	počet závitů před korekcí	$N_1$	[-]	27000
	počet závitů po korekci	$N_1^k$	[-]	26811
	počet poloh		[-]	59
1 poloha - zesílený vodič mezi sekcemi 5 závitů roztaženě, šířka sekce 35 mm		1 poloha	2 sekce	76 závitů
2 až 57 poloha šířka sekce 30 mm		56 poloh	2 sekce	235 závitů
58 poloha, šířka sekce 21 mm		1 poloha	2 sekce	152 závitů
59 poloha – zesílený vodič mezi závitů je vinutý vlasec 1 mm, šířka sekce 21 mm		1 poloha	2 sekce	15 závitů
	šířka		[mm]	94
	výška	$h_1$	[mm]	16,3
	střední průměr	$D_1$	[mm]	111,3
	vnější průměr	$D_{e1}$	[mm]	127,6
Proklad mezi polohami	tloušťka		[mm]	0,14
	šířka		[mm]	45, 40



Nyní spočteme celkové činné ztráty dle vztahu (7.40), volíme činitel  $k = 1,05$ , hmotnost obvodu známe z (8.7)  $m_{Fe} = 8,7$  kg, měrné ztráty na jednotku hmotnosti určíme z charakteristiky pro Q jádro typ 13 070 viz příloha A1. Ztrátový proud spočítáme vztahem (7.41). Magnetizační proud ze vztahu (7.39), kde z (8.5) známe délku střední siločáry  $l_m = 0,565$  m,  $N_2 = 225$  závitů a  $H_{Fe}$  odečteme z magnetizační charakteristiky příloha A1.

Tab. 8-4 Výsledné ztrátové a magnetizační proudy v závislosti na napětí  $U_2$

$U_2^8 = 0,8 U_{2n}$	$B^8 = 0,8 B_n$	$p_{Fe}^8$	$P_{Fe}^8 = k m_{Fe} p_{Fe}^8$	$I_{2Fe}^8 = \frac{P_{Fe}^8}{U_2^8}$	$H_{Fe}^8$	$I_{2m}^8 = \frac{H_{ef}^8 l_m}{N_2}$
[V]	[T]	[W·kg <sup>-1</sup> ]	[W]	[A]	[A·m <sup>-1</sup> ]	[A]
80	0,8	0,185	1,69	0,021	25	0,063
$U_2^{12} = 1,2 U_{2n}$	$B^{12} = 1,2 B_n$	$p_{Fe}^{12}$	$P_{Fe}^{12} = k m_{Fe} p_{Fe}^{12}$	$I_{2Fe}^{12} = \frac{P_{Fe}^{12}}{U_2^{12}}$	$H_{Fe}^{12}$	$I_{2m}^{12} = \frac{H_{ef}^{12} l_m}{N_2}$
[V]	[T]	[W·kg <sup>-1</sup> ]	[W]	[A]	[A·m <sup>-1</sup> ]	[A]
120	1,2	0,35	3,2	0,027	41,7	0,105

Pro určení pole skutečných chyb nás budou zajímat tyto provozní stavy napěťového transformátoru

- stav naprázdno pro napětí  $U_2 = 0,8 U_{2n}$  (vztahy 5.3, 5.4, 5.7, 5.8)
- stav naprázdno pro napětí  $U_2 = 1,2 U_{2n}$  (vztahy 5.3, 5.4, 5.7, 5.8)
- stav pro zatížení břemenem  $0,25 P_n$  pro  $U_2 = 0,8 U_{2n}$  a  $1,2 U_{2n}$  (vztahy 5.1, 5.2, 5.5, 5.6)
- stav pro zatížení břemenem  $P_n$  pro  $U_2 = 0,8 U_{2n}$  a  $1,2 U_{2n}$  (vztahy 5.1, 5.2, 5.5, 5.6)

Chyba napětí a úhlu pro provozní stavy a) a b) odpor je dán vztahem (8.27) a reaktance vztahem (8.31). Výpočty jsme vzhledem k častým změnám v přepočtu odporů prováděli v programu EXCEL. Výsledky jsme zapsali přehledně do tabulky (tab. 8-5).

Tab. 8-5 Chyby napětí a úhlu při stavu naprázdno

$U_2^8 = 0,8 U_{2n}$	$R_1'$	$X_1'$	$I_{2Fe}^8$	$I_{2m}^8$	$\varepsilon_{u0R}^8$	$\varepsilon_{u0X}^8$	$\delta_{u0R}^8$	$\delta_{u0X}^8$	$\varepsilon_{u0}^8$	$\delta_{u0}^8$
[V]	[Ω]	[Ω]	[A]	[A]	[%]	[%]	[min]	[min]	[%]	[min]
80	1,439	0,858	0,021	0,063	0,038	0,068	3,90	-0,77	0,105	3,12
$U_2^{12} = 1,2 U_{2n}$	$R_1'$	$X_1'$	$I_{2Fe}^{12}$	$I_{2m}^{12}$	$\varepsilon_{u0R}^{12}$	$\varepsilon_{u0X}^{12}$	$\delta_{u0R}^{12}$	$\delta_{u0X}^{12}$	$\varepsilon_{u0}^{12}$	$\delta_{u0}^{12}$
[V]	[Ω]	[Ω]	[A]	[A]	[%]	[%]	[min]	[min]	[%]	[min]
120	1,439	0,858	0,027	0,105	0,032	0,075	4,33	-0,66	0,107	3,67

Chyba napětí a úhlu pro provozní stavy c) a d), kde průchozí odpor je dán vztahem (8.29), průchozí reaktance vztahem (8.31),  $\cos \beta = 0,8$ ,  $\sin \beta = 0,6$  pro provozní stav c) dále platí

$$I_2 = I_{2n} = \frac{P_n}{U_{2n}} = \frac{30 \text{ VA}}{100 \text{ V}} = 0,3 \text{ A} \quad (8.33)$$

a pro provozní stav d) platí

$$I_2 = 0,25 I_{2n} = 0,25 \cdot 0,3 \text{ A} = 0,075 \text{ A} \quad (8.34)$$



proto z hodnot chyb pro provozní stav c) získáme hodnoty chyb pro provozní stav d) vynásobením konstantou 0,25.

Tab. 8-6 Chyby napětí a úhlu při zatížení břemenem

$P^{100} = P_n$	$U_2$	$R$	$X$	$\varepsilon_{uR}^{100}$	$\varepsilon_{uX}^{100}$	$\delta_{uR}^{100}$	$\delta_{uX}^{100}$	$\varepsilon_u^{100}$	$\delta_u^{100}$
[VA]	[V]	[Ω]	[Ω]	[%]	[%]	[min]	[min]	[%]	[min]
30	100	2,097	1,716	0,503	0,309	12,98	-14,17	0,812	-1,18
$P^{25} = 0,25 P_n$	$U_2$	$R$	$X$	$\varepsilon_{uR}^{25}$	$\varepsilon_{uX}^{25}$	$\delta_{uR}^{25}$	$\delta_{uX}^{25}$	$\varepsilon_u^{25}$	$\delta_u^{25}$
[VA]	[V]	[Ω]	[Ω]	[%]	[%]	[min]	[min]	[%]	[min]
7,5	100	2,097	1,716	0,126	0,077	3,25	-3,54	0,203	-0,30

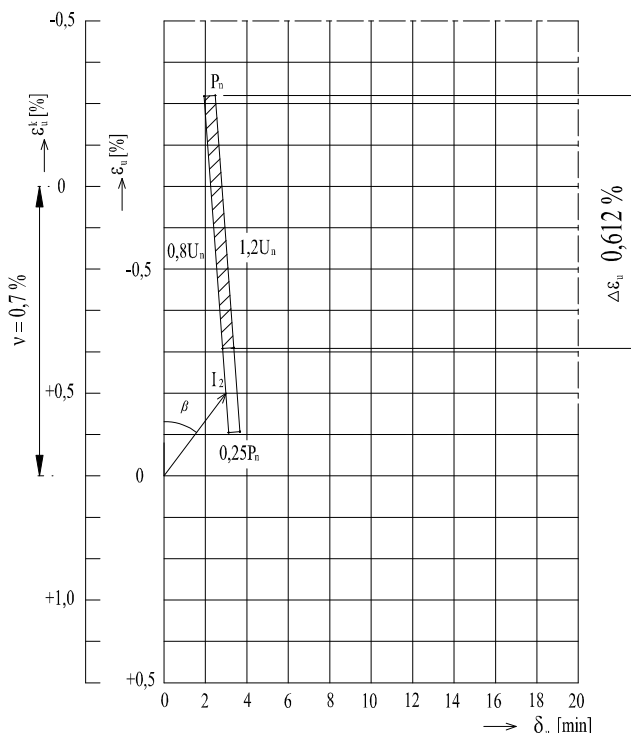
Celkové chyby napětí a úhlu pro jednotlivé sledované stavy

Tab. 8-7 Celkové chyby napětí a úhlu pro jednotlivé sledované stavy

stav naprázdno zatížení břemenem			$\varepsilon_{u0}^8$	$\delta_{u0}^8$	$\varepsilon_{u0}^{12}$	$\delta_{u0}^{12}$
			[%]	[min]	[%]	[min]
			0,105	3,12	0,107	3,67
$\varepsilon_u^{100}$	[%]	0,812	0,918		0,920	
$\delta_u^{100}$	[min]	-1,18		1,94		2,48
$\varepsilon_u^{25}$	[%]	0,203	0,308		0,310	
$\delta_u^{25}$	[min]	-0,30		2,83		3,37

Vypočtené chyby z tabulek zaneseme do komplexního diagramu chyb a obdržíme tak pole skutečných chyb nekorigovaného transformátoru. Porovnáme s polem dovolených chyb podle zadání a posoudíme velikost nutné korekce  $v$  [%]. Úprava chyb (závitová korekce) je řešena v kapitole 5.2.

Pokud srovnáme komplexní diagram chyb pro námi počítaný transformátor s komplexním diagramem chyb obr. 8-2, ze kterého jsme vycházeli, pak si můžeme povšimnout, že sklony pole chyb si téměř odpovídají. V kapitole 4.2 jsme si řekli, že velikost chyby úhlu s břemenem klesá (obr. 4-6), velikost chyby napětí s břemenem roste (obr. 4-5) a velikosti obou chyb s napětím rostou (obr. 4-8 a 4-9) i toto v našem případě odpovídá.



Obr. 8-3 Znázornění vypočtených chyb transformátoru napětí v komplexním diagramu chyb



V komplexním diagramu chyb jsme odměřili rozpětí chyby napětí  $\Delta\epsilon_u = 0,612 \%$ . Velikost rozpětí je menší, než dvojnásobná přesnost transformátoru podle zadání.

$$\Delta\epsilon_u = \epsilon_u^{8/100} - \epsilon_u^{12/25} = 0,920 - 0,308 = 0,612 \% \quad (8.35)$$

$$\Delta\epsilon_u = 0,612 \% \leq 2Tp = 1\% \quad (8.36)$$

To znamená, že transformátor po korekci s velkou rezervou vyhoví zadané přesnosti. Korekcí se budeme snažit přesunout s jistou rezervou bod komplexního diagramu odpovídající zátěži 25% jmenovité při napětí 120% jmenovitého k hranici maximální dovolené chyby napětí v plusové části diagramu (viz obr. 8-3). To znamená počátek nové stupnice ( $\epsilon_u^k$ ) posuneme o hodnotu  $\nu$  [%] směrem nahoru. V diagramu jsme zvolili  $\nu = 0,6 \%$ . Korekce napěťového transformátoru zmenšením počtu závitů primárního vinutí viz vztah (5.14)

$$\Delta N_1^k = N_1 \frac{\nu}{100} = 27000 \cdot \frac{0,7 \%}{100} = 189 \text{ závitů} \quad (8.37)$$

a dle vztahu (5.17)

$$N_1^k = N_1 - \Delta N_1^k = 27000 - 189 = 26811 \text{ závitů} \quad (8.38)$$



## 9 STRUČNÝ POPIS VÝROBY TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ

### 9.1 Magnetické jádro

Používané materiály na magnetická jádra jsme již popisovali v kapitole 6. U našeho transformátoru napětí jsme navrhli vinuté stupňovité Q jádro. Toto jádro nám zhotoví na míru válcovny plechu Technotron, s.r.o. Frýdek Místek. Jádro bude vyrobeno z orientovaného transformátorového pásu s keramickou izolací (TRAFOKER) s obsahem křemíku cca 3 %, v tloušťce 0,30 mm; materiál C22 dle ČSN IEC 404-1.

Na jádro bude nasunuto pouzdro se sekundárním vinutím a nad ním pouzdro s primárním vinutím. Pak se přiloží druhý díl Q jádra a oba dva díly se stáhnou stahovací ocelovou páskou na které jsou přichyceny matice pro upevnění do odlévací formy. Čtyři matice jsou umístěny na spodní straně delší větve jádra, kolem které není umístěno sekundární a primární vinutí a tím docílíme fixace ve formě.

Následuje obmotání jádra vlnitou lepenkou tloušťky 2 až 3 mm, která zajistí možnost dilatování před smršťujícím epoxidem, lepenka se bandážuje PVC páskou s polovičním překrytím, čímž se zabrání protečení epoxidové hmoty do lepenky. Další vrstvu tvoří polovodivá krepová páska (stínění – ekvipotenciální plocha), obchodní označení CARBON BLACK INSUFLEX PAPER – fa MASTEN WRIGHT (s polovičním překrytím).

### 9.2 Sekundární vinutí

Na laminátovou trubku pro sekundární vinutí je navinuto sekundární vinutí DAMID LCIA-2 (dvojsmalt) POLYESTERIMID, navíjení pomocí toroidní navíječky. Drát je vhodný k navíjení, trvalá teplota 180 °C, krátkodobě až 240 °C, (tepelná třída H). Drát od Švédské firmy DAHREN TRÁD. Průměr drátu 1,4 mm se smaltovanou vrstvou 1,502 mm (pro GRAD 2 – dvojsmalt, dle normy IEC 317). Provedeno 225 závitů ve 3 polohách. Konce vinutí jsou ukončeny na stejné straně vinutí protože vinutí je ve 4 polohách a jsou na ně nasunuty ochranné trubičky. Konce vinutí jsou přiloženy nad PVC vrstvou magnetického jádra a jsou přivedeny až do svorkovnice a teprve nad nimi je krepová páska obmotaná kolem jádra. Mezi jednotlivými vrstvami vinutí je proklad H 2511 (v jedné vrstvě 0,011mm) TRIVOLTON. Nad 4 vrstvou vinutí je navíc proklad zesílený PE 33 (v jedné vrstvě 0,33 mm) jde o materiál se stejnými vlastnostmi jako TRIVOLTON se silnější vrstvou a následuje krepová vrstva (s polovičním překrytím).

### 9.3 Primární vinutí

Na laminátovou trubku pro primární vinutí, která je natřena polovodivým lakem (nahrazuje fólii), jde tedy o ekvipotenciální plochu. Výhodou polovodivého nátěru je, že nevzniká ostrá hrana. Primární vinutí má celkem 26811 závitů, které jsou rozděleny do dvou sekcí. První poloha závitů je zesíleným drátem 0,4 mm se smaltovou izolací 0,459 mm. První poloha má dvě sekce, mezi kterými je 5 závitů roztaženě. Jeden z roztažených závitů se odizoluje a musí se dotýkat polovodivé vrstvy.

Na konce zesíleného drátu se napájí drát sekundárního vinutí průměru 0,118 mm a kolem spoje se přehne proklad z TRIVOLTONu. Nad zesílenou první vrstvou následují dvě sekce vinutí drátem průměru 0,118 mm, se smaltovanou vrstvou má průměr 0,145 mm. Mezi jednotlivými



vrstvami vinutí je proklad TRIVOLTON H 2507 (ve dvou vrstvách, tedy 0,014mm). Obě sekce budou symetrické a nebudou odstupňované.

Vnější vrstva bude opět zesílená drátem průměru 0,4 mm, navíc se mezi vnější a další vrstvu aplikuje zesílená izolace skelnou rohoží, do které proteče epoxid a tím se zvýší izolace. Mezi závit vnější zesílené vrstvy se namotá silonový vlasec průměru 1 mm. Následuje opět vrstva se skelnou rohoží a nad ní proklad TRIVOLTON H 2507 (dvě vrstvy).

Dále se cívka odpruží proti smrštění epoxidu mikropřýží 3 mm, která se přehne tak, že vrstva bude mít tloušťku 6 mm a na okrajích bude radius 3 mm (nebude ostrá hrana). Mikropřýž bude obalena polyesterem KREMPEL (polovodivá vrstva).

Primární vinutí bude drženo vývody, bude samonosné. Primární vinutí nebude propojeno žádnou konstrukcí na sekundární vinutí, což je rozdíl oproti jednopólově izolovaným přístrojovým transformátorům.

## 9.4 Předzkouška a korekce

Po navinutí primárního vinutí probíhá, zejména u prvního vyrobeného kusu, předzkouška, kdy se kontroluje zda je splněna požadovaná přesnost, změří se chyba napětí a chyba úhlu. Pokud není splněna požadovaná přesnost, provede se korekce odmotáním závitů primárního vinutí. U dalších stejných transformátorů se již navíjí korigovaný počet závitů primárního vinutí a od předzkoušky se upouští.

## 9.5 Modely a formy

Vzhledem k tomu, že řešíme transformátor napětí pro venkovní použití je nutné opatřit přístrojový transformátor napětí izolátorovými stříškami. Nejprve se vyhotoví model a poté forma k odlévání našeho transformátoru. Při řešení tvaru izolátorových stříšek se postupuje dle francouzské normy IEC 815. Modely a formy se navrhují tak, aby celý přístrojový transformátor byl odlitý jako jeden kus, čímž docílíme homogenního epoxidového prostředí.

### Modely a formy :

- kovové – železo, hliník
- plastové – stejný materiál jako licí hmota
- kombinované – skládají se z dílů kovových i plastových

## 9.6 Odlévání epoxidových pryskyřic

Vrstva minimálně 10 mm kolem vinutí pro 12 kV.

### Základní potřebné zařízení :

- autokláv – vakuové lití
- mísič – 5 hodin pře začátkem plnění 81 °C
- ruční mísič – 1,5 hodiny před začátkem plnění na 67 °C
- sušky – na vytvrzování 140 °C, předehřev forem a plniva 80 až 90 °C





**Složení licí směsi :**

- epoxidová pryskyřice EP-NOVA, nažloutlá, hustší kapalina podobná medu
- tvrdidlo TVR-2, téměř průhledná kapalina, velmi řídká
- plnivo – mletý křemen. Velmi jemný prášek, podobný hladké mouce. Plnivo se přidává, aby zlepšilo mechanické vlastnosti odlitku a určuje pevnost a tvrdost odlitku. Málo naplněná hmota je křehká, hodně naplněná hmota je těžce zpracovatelná (špatně zatéká). Hustota směsy je přímo úměrná teplotě. Má největší vliv na koeficient smrštění odlitku.
- hnědé barvivo EPROTINT – velmi hustá tekutina podobná pastě
- urychlovač K-NOVA – žlutá tekutina podobná oleji. Urychlovač se přidává do hotové směsi pouze k urychlení technologických časů. Je nutné jeho přesné navážení, protože ovlivňuje všechny mechanické a některé elektrické vlastnosti odlitku.

**Lití :**

- vakuové – licí směsi jsou řídké a teplé, velmi krátká doba zpracování (30 až 60 min), lití ve vakuové komoře
- atmosférické – licí směs se vypustí do připravené nádoby a lití probíhá přímo v předtvrzovací peci
- tlakové – licí směsi jsou hustší a studené, vysoká teplota forem urychluje časy na zpracování

**Předtvrzení** – formy jsou v suškách a je nutné dolévat licí hmotu

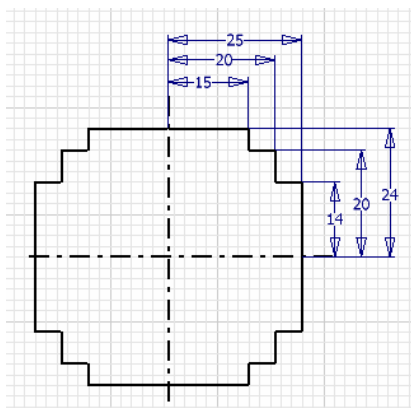
**Rozformování** – rozebrání formy před dotvrzením, závisí na jednotlivých typech transformátorů

**Dotvrzení** – dotvrzování při teplotě 140 °C po dobu 12 hodin.

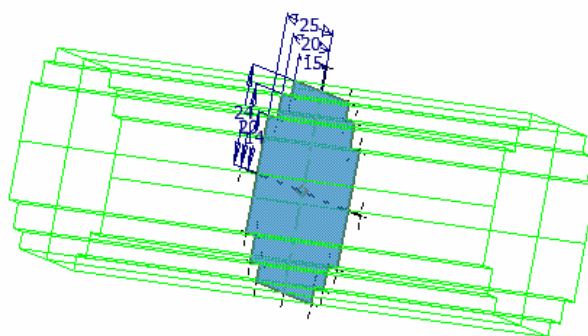
## 10 ZNÁZORNĚNÍ VINUTÍ A MAGNETICKÉHO OBVODU V 3D MODULU

Ke znázornění modelu jsme zvolili program INVENTOR, ve kterém jsme znázornili magnetické jádro a vinutí s respektováním rozměrů navržených ve výpočtové části práce kapitole 8.

Podkladem pro nakreslení magnetického jádra je již hotový 2D výkres magnetického jádra kreslený v programu AutoCAD. Při kreslení každé komponenty se vychází z náčrtu, který si nejprve nakreslíme obecně bez kót, snažíme se dodržet kolmosti a rovnoběžnosti čar. U našeho náčrtku řezu jádra magnetického obvodu stačilo nakreslit čtvrtinu náčrtku, okótovat a teprve potom pomocí zrcadlení vzhledem k osám se dokompletoval celý náčrtek obr. 10-1.

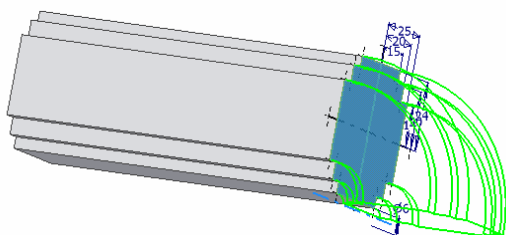


Obr. 10-1 Náčrt řezu jádra

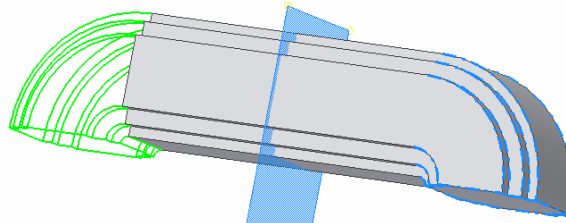


Obr. 10-2 Vysunutí řezu jádra

Po dokončení náčrtku jsme pokračovali tvorbou objemového prvku tím, že obrys byl vysunut ve směru kolmém na rovinu náčrtku. Tímto způsobem jsme dosáhli nakreslení rovného úseku našeho jádra v délce 126 mm. Protažení lze provést buď v jednom nebo druhém směru a nebo jako v našem případě souměrně do obou směrů obr. 10-2.

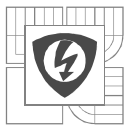


Obr. 10-3 Rotování řezu jádra

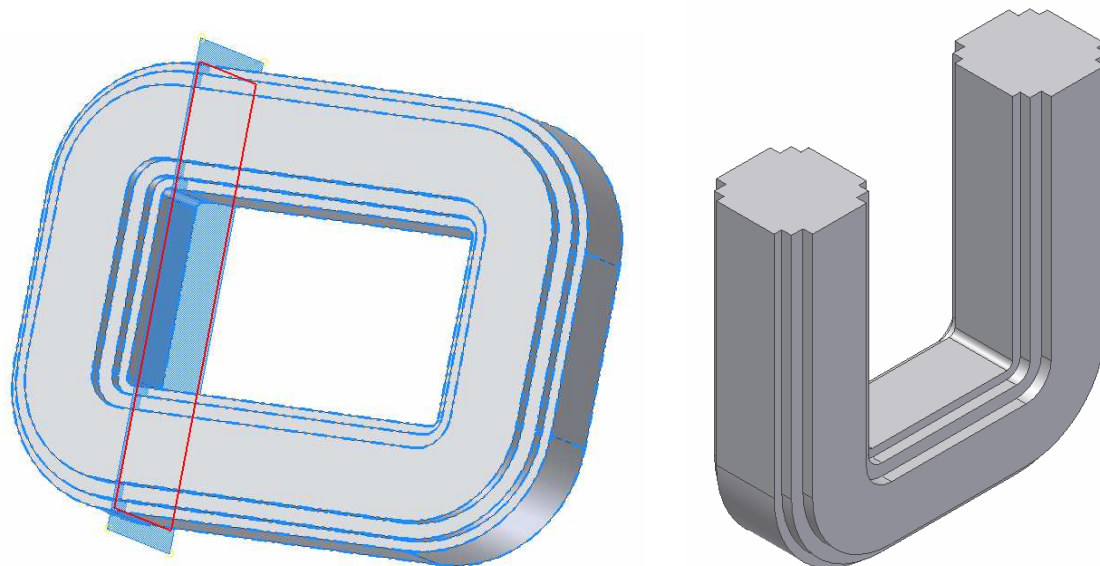


Obr. 10-4 Zrcadlení prvku jádra

Další část jádra jsme udělali za pomoci okopírovaného náčrtu, který jsme tentokrát rotovali podle osy obr.10-3. Další prvek jsme doplnili zrcadlením podle plochy symetrie obr. 10-4. Následoval prvek kratšího rovného úseku, který jsme opět vytvořili pomocí náčrtu obr. 10-1 a zrcadlili jsme jej symetricky podle plochy, poslední části jádra jsme také získali zrcadlením podle roviny symetrie.



Po dokončení celého jádra, jsme jádro rozřizli pomocí pomocné roviny na dvě části a získali jsme tak naše Q-jádro navržené pro transformátor napětí obr. 10-5. Na obr. 10-6 je jedna z částí Q-jádra.



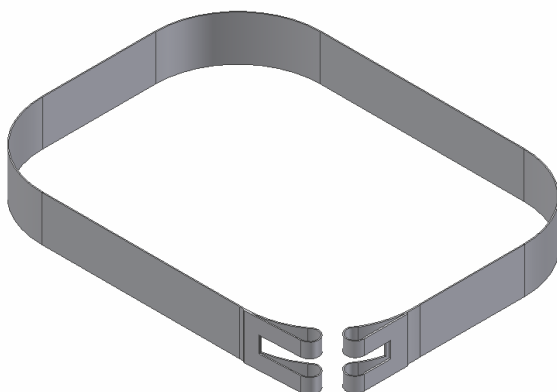
*Obr. 10-5 Rozdělení jádra*

*Obr. 10-6 Hotový komponent jádra*

Primární vinutí, které je rozděleno do dvou sekcí jsme kreslili pomocí vysouvání náčrtů s mezikružím nejprve pro jednu sekci a potom se zrcadlením dokončilo celé primární vinutí obr. 10-7. Druhou možností, jak primární vinutí udělat pomocí jediného náčrtu, je vytvoření náčrtu poloviny podélného řezu, která se následně rotuje kolem osy rotace.



*Obr. 10-7 Primární vinutí*



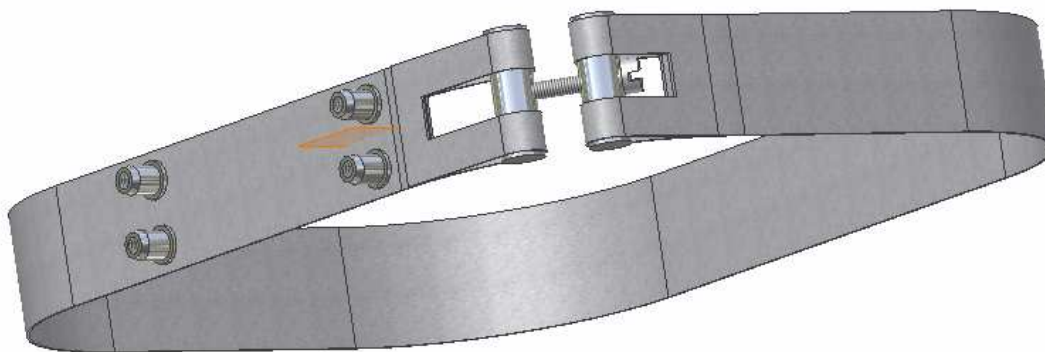
*Obr. 10-8 Stahovací pásek*



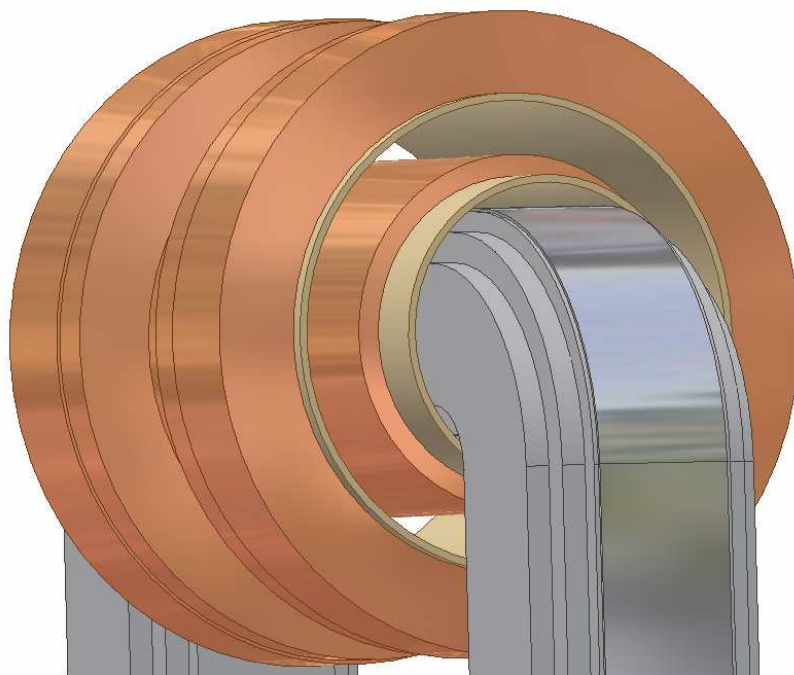
*Obr. 10-9 Upínací matice*

Dále jsme si nakreslili stahovací pásek, který složí pro utažení obou částí jádra obr. 10-8. K nákresu nám posloužil vnější obvod magnetického jádra a k němu se sestrojila ekvidistanta, vzdálenost k ekvidistantě už stačilo zakótovat jedinou kótou. Po vysunutí na šířku pásku již stačilo jen odstranit část stahovacího pásku na koncích, kde jsou oka pro stahovací čepy, což jsme provedli odečtením nově vytvořeného objemového prvku, od prvku původního, přičemž došlo k odečtení objemu který byl ve vzájemném průniku. U hotového pásku jsme ještě zkosili ostré hrany. Na stahovacím pásku jsou upevněny matice pro uchycení na odlévací formu obr. 10-9. Základní objem matice jsme provedli opět s pomocí náčrtku, který jsme rotovali kolem osy rotace. Do vnitřního otvoru jsme pomocí příkazu zadali závit. Jako další komponenty jsme si nakreslili čep do stahovacího pásku a utahovací šroub se závitem a v hlavičce s drážkou na klasický šroubovák.

Po dokončení všech komponent jsme přistoupili k tvoření sestav. Do sestavy jsme nejprve vložili všechny potřebné komponenty a pak už jsme přistoupili k zadávání vzájemných vazeb mezi prvky. Vazbami se myslí orientace požadované plochy na jedné komponentě vůči ploše na druhé komponentě. Vazby lze dělat mezi rovinnými plochami i mezi rotačními. Na obr. 10-10 již máme sestavu několika komponent. Stahovací pásek je doplněn o dva válcové čepy, utahovací šroub a upevňovací matice. Po umístění dvou matic jsme využili na další dvě matice zrcadlení.

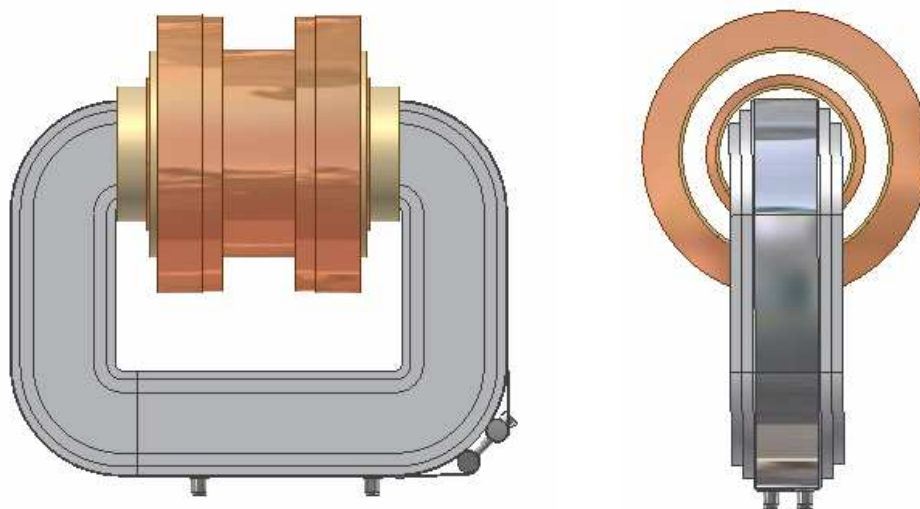


*Obr. 10-10 Sestava stahovacího pásku*



*Obr. 10-11 Sestava magnetického jádra a obou vinutí*

Na obr. 10-11 je sestava všech komponent jádra a vinutí. Pomocí vazeb jsme dosáhli, že primární I sekundární vinutí a pouzdra primárního a sekundárního vinutí, jsou pevně spojena společnou osou a druhou doplňkovou vazbou se docílilo přesného vycentrování všech válcových komponent mezi sebou a k jádru.

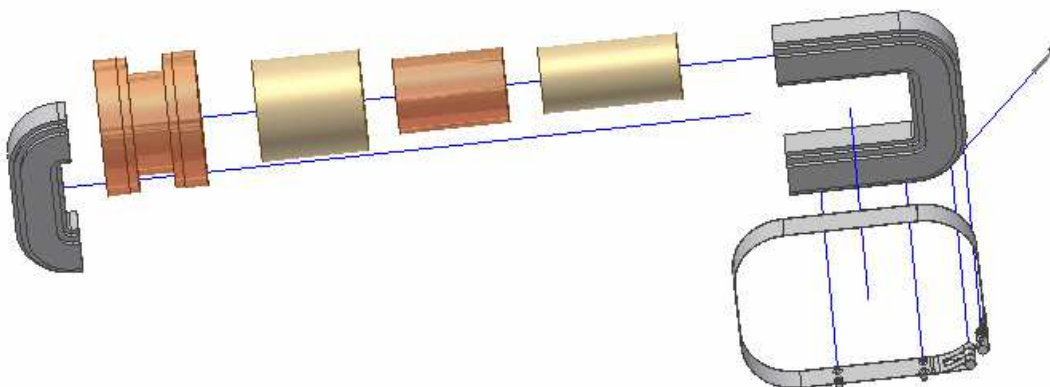


*Obr. 10-12 3D model jádro a vinutí - čelní pohled*

*Obr. 10-13 3D model jádro a vinutí – boční pohled*



Nakonec se k vytvořené sestavě dá zhotovit animace. Jednotlivé komponenty nebo skupiny komponent se postupně posouvají v trajektorii po jedné ose o požadovanou vzdálenost, může se měnit směr pohybu a také se dá součást otáčet, dá se tak vytvořit současně pohyb rotační a translační, což je efektní zejména u šroubků.



Na obr. 10-14 je znázornění sestavy po rozbití, po spuštění animace dojde k postupnému pohybu střídavě po jedné součásti nebo všechny součásti současně podle předdefinování.



## ZÁVĚR

V diplomové práci je postupováno chronologicky od definování základních pojmů, přes teoretický základ nutný pro pochopení funkce měřicích transformátorů napětí a jejich výpočet až po konkrétní výpočet měřicího transformátoru pro měření sdruženého napětí venkovního provedení na 12 kV. Pro práci bylo využito možnosti získání praktických zkušeností přímo z výrobního podniku KPB INTRA Bučovice, který je zaměřen na výrobu přístrojových transformátorů od roku 1995.

Na náhradním schématu byl proveden rozbor funkce přístrojového transformátoru napětí a na fázorových diagramech, které znázorňují velikost a fázové posunutí mezi fázory napětí a proudů primárních i sekundárních stran transformátoru, byla ukázána podstata vzniku chyb přístrojových transformátorů napětí. Fázorové diagramy, použité v teoretické části práce, mají pouze obecný charakter. Přesné fázorové diagramy získáme při výpočtu konkrétního přístrojového transformátoru, kdy znázorníme přesné hodnoty.

V kapitole 4 byl řešen u prvků z náhradního schématu jejich vliv na chyby přístrojových transformátorů napětí. Zejména vliv břemene, napětí, sekundárního účinníku a kmitočtu. V kapitole 5 byl řešen výpočet chyb a jejich složek, jakým způsobem se provádí úpravy chyb pomocí závitové korekce a ukázali jsme si jak se počítá průchozí impedance z komplexního diagramu chyb. V kapitole 6 je popsána hlavní skupina magneticky měkkých materiálů, které jsou vhodné pro magnetické obvody přístrojových transformátorů napětí, ukázali jsme si co to je Gossova textura a kubická textura u křemíkových ocelí a také je ukázáno jaké tvary průřezů magnetických jader se používají.

V kapitole 7 byl proveden teoretický postup výpočtu a v kapitole 8 byl proveden konkrétní výpočet transformátoru napětí dle zadání. K transformátoru byla spočtena chyba napětí a úhlu a ukázalo se, že po provedené korekci ubráním závitů primárního vinutí je požadovaná přesnost transformátoru splněna.

V kapitole 9 byl proveden stručný popis výroby přístrojového transformátoru napětí a na základě vypočtených rozměrů z kapitoly 8 byl sestaven návrh funkčního modelu transformátoru napětí venkovního provedení, který je znázorněn v příloze B. Závěrečná kapitola 10 je věnována znázornění vinutí a magnetického obvodu v 3D modulu pomocí programu INVENTOR.

Domnívám se, že práce byla zpracována v rozsahu podle zadání diplomové práce a výsledky je možné použít jako ideový základ pro konkrétní výrobu zadaného transformátoru napětí v KPB INTRA Bučovice. K tomu bych chtěl jenom podotknout, že klasická metoda výpočtu použitá v této práci a vhodná pro celkové pochopení problematiky představuje mnohahodinové pracovní úsilí, moderní počítačové programy dávají použitelné výsledky do několika minut. Programy, které se používají pro rychlé výpočty, byly vytvářeny na podobném základu jako je náš výpočet, avšak při jejich vzniku a v návaznosti při jejich testování byly doladěny do té míry, že jejich výpočty jsou reálnější, než jaké vycházejí z této práce. Při výpočtech došlo k řadě chyb zaokrouhlováním, nepřesným odečítáním z charakteristik, řada hodnot byla volena na základě praktických zkušeností a v některých případech byla provedena určitá zjednodušení, aby výpočty nebyly až příliš složité. Nicméně výsledky této práce s počítačovým zpracováním měřicího napětíového transformátoru podle stejného zadání jsou si velmi blízko.





## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KRÁL, J., VANĚK, J. Elektromagnetické přístroje, Brno 1984
- [2] GROSS, B., VÁVRA, Z. Laboratorní a numerická cvičení z el. přístrojů, Brno 1983
- [3] KOPEČEK, J., DVOŘÁK, M. Přístrojové transformátory, 1966
- [4] VELEŠÍK, P., Bakalářská práce – Přístrojový transformátor proudu na 12 kV, Brno 2006
- [5] ČSN 35 1360 Přístrojové transformátory proudu a napětí, Říjen 1974
- [6] ČSN EN 60044-2 Přístrojové transformátory – Část 2: Induktivní transformátory napětí, Duben 2001
- [7] ČSN EN 60044-2 ZMĚNA A1 Přístrojové transformátory-Část 1: Induktivní transformátory napětí, Srpen 2001
- [8] ČSN EN 60044-2 ZMĚNA A2 Přístrojové transformátory-Část 1: Induktivní transformátory napětí, Září 2003

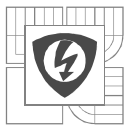


**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$B$	magnetické indukce	T
$B$	susceptance transformátoru napětí	S
$B_n$	hodnota jmenovité magnetické indukce	T
$D_{1,2}$	střední průměr vinutí primáru a sekundáru	mm
$D_{e1,2}$	vnější průměr vinutí primáru a sekundáru	mm
$D_{i1,2}$	vnitřní průměr vinutí primáru a sekundáru	mm
$D_{m1,2}$	vnitřní průměr pouzdra vinutí primáru a sekundáru	mm
$D_{o2}$	průměr opsané kružnice jádra	mm
$D_S$	střední průměr mezery mezi primárem a sekundárem	mm
$G$	vodivost transformátoru napětí	S
$H$	intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
$H_{ef}$	efektivní hodnota intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
$I_1$	proud primáru	A
$I_{10}$	proud v příčné větvi (komplexní součet $I_{1Fe}$ a $I_{1m}$ )	A
$I_{1,2Fe}$	proud na krytí ztrát v železe	A
$I_{1,2m}$	proud magnetizační	A
$I_2$	proud sekundáru	A
$I_{20}$	proud naprázdno na počet závitů sekundáru	A
$I_1'$	přepočtený proud primáru na počet závitů sekundáru	A
$I_2'$	přepočtený proud sekundáru na počet závitů primáru	A
$I_{10}'$	proud naprázdno přepočtený na počet závitů sekundáru	A
$K_{nm}$	činitel zvýšení napětí	-
$L$	indukčnost	H
$L_{1,2}$	celková délka primárního a sekundárního vodiče	m
$N^k$	nový počet závitů vinutí po korekci	-
$\Delta N^k$	závitová korekce (změna počtu závitů)	-
$N_1, N_2$	počet závitů primárního a sekundárního vinutí	-
$N_1^k, N_2^k$	korigovaný počet závitů primárního a sekundárního vinutí	-
$\Delta N_1^k, \Delta N_2^k$	korigovaný počet závitů primárního a sekundárního vinutí	-
$N_e$	počet závitů na 1 V	$V^{-1}$
$P$	zátěž transformátoru napětí	VA
$P_o$	příkon naprázdno	VA
$P_{B,C}$	zátěž pro daný bod B nebo C	VA
$P_{Fe}$	ztráty transformátoru v železe, celkové činné ztráty	VA
$P_{ku}$	krajní zátěž transformátoru napětí	VA
$P_n$	jmenovitá zátěž transformátoru napětí	VA
$R$	činný odpor, průchozí odpor	$\Omega$
$R_1$	činný odpor primárního vinutí	$\Omega$
$R_2$	činný odpor sekundárního vinutí	$\Omega$
$R_1'$	přepočtený odpor primáru na počet závitů sekundáru	$\Omega$
$R_2'$	přepočtený odpor sekundáru na počet závitů primáru	$\Omega$
$R_{Fe}$	náhradní odpor ztrát v železe	$\Omega$
$R_v$	odpor připojovaného vedení	$\Omega$



$S$	průřez jádra se zohledněním činitele plnění	$\text{m}^2$
$S_{1,2}$	průřez primárního a sekundárního vodiče	$\text{mm}^2$
$S_j$	průřez jádra bez zohlednění činitele plnění	$\text{m}^2$
$T_p$	třída přesnosti	-
$U_1$	primární napětí	V
$U_{10}$	indukované napětí na primáru	V
$U_{1n}$	jmenovité primární napětí	V
$U_2$	sekundární napětí	V
$U_2^k$	korigované napětí sekundáru	V
$U_{20}$	indukované napětí na sekundáru	V
$U_{2n}$	jmenovité sekundární napětí	V
$U_f$	zkušební napětí střídavé	V
$U_m$	nejvyšší napětí soustavy	V
$U_n$	jmenovité napětí soustavy	V
$U_{nm}$	zvýšené napětí (zkušební na oteplení)	V
$U'_{10}$	přepočtená hodnota indukovaného napětí primáru na počet závitů sekundáru	V
$U'_2$	přepočtené napětí sekundárního vinutí	V
$U'_{20}$	přepočtená hodnota indukovaného napětí sekundáru na počet závitů primáru	V
$\Delta U$	fázorová chyba, fázor úbytku, celkový úbytek transformátoru napětí	V
$\Delta U_1$	úbytek na primáru	V
$\Delta U'_2$	úbytek na sekundáru přepočtený na počet závitů primáru	V
$X$	reaktance vinutí, průchozí reaktance	$\Omega$
$X_1$	reaktance primárního vinutí	$\Omega$
$X_2$	reaktance sekundárního vinutí	$\Omega$
$X'_1$	přepočtená reaktance primáru na počet závitů sekundáru	$\Omega$
$X'_2$	přepočtená reaktance sekundáru na počet závitů primáru	$\Omega$
$X_m$	rozptylová reaktance	$\Omega$
$Y$	admitance	S
$Z$	břemeno transformátoru proudu, průchozí impedance	$\Omega$
$Z'$	břemeno transformátoru proudu přepočítané na počet závitů primáru	$\Omega$
$Y$	břemeno transformátoru napětí (admitance)	S
$Y_n$	jmenovité břemeno transformátoru napětí (admitance)	S
$a$	chyba úhlu v procentech, délka přímky	%
$a_{1,2}$	výška vinutí primáru a sekundáru pro výpočet reaktance	mm
$b$	šířka mezery mezi primárním a sekundárním vinutím	mm
$d_{1,2}$	průměr vodiče primáru a sekundáru	mm
$d_z$	průměr zesíleného vodiče primáru	mm
$d_{1,2,z \max}$	maximální průměr vodiče se smaltem	mm
$h_{1,2}$	výška vinutí primáru a sekundáru	mm
$k$	činitel přidavných ztrát vzniklých skládáním a zpracováním plechů	-
$k_u$	jmenovitý převod transformátoru napětí	-
$k_{sk}$	skutečný převod transformátoru napětí	-
$l_{1,2}$	střední délka závitu primáru a sekundáru	mm
$l_m$	délka střední siločáry magnetického pole	m
$m$	izolační předěl mezi primárem a sekundárem	mm
$m_{Fe}$	hmotnost magnetického obvodu	kg
$p_{Fe}$	měrné magnetické ztráty	$\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$



$\Delta q$	měrný magnetický příkon	$\text{VA} \cdot \text{kg}^{-1}$
$s_{1,2}$	šířka vinutí primáru a sekundáru	mm
$t_{1,2}$	tloušťka pouzdra primáru a sekundáru	mm
$\alpha$	úhlu mezi budícím proudem a jeho magnetickou složkou	°
$\beta$	úhlu mezi zatěžovacím proudem $I_2$ a napětím $U_2$	°
$\cos \beta$	sekundární účinník transformátoru napětí	-
$\delta_u$	chyba úhlu transformátoru napětí	min
$\Delta \delta_u$	rozpětí chyb úhlu	min
$\delta_{uOR}$	složka chyby napětí od proudu naprázdno $I_{20}$	min
$\delta_{uOX}$	složka chyby napětí od proudu naprázdno $I_{20}$	min
$\delta_{uR}$	složka chyby napětí od zatěžovacího proudu $I_2$	min
$\delta_{uX}$	složka chyby napětí od zatěžovacího proudu $I_2$	min
$\overline{\delta_u}$	chyba úhlu v procentech, délka oblouku	%
$\varepsilon_{RB,C}$	úbytek na průchozím odporu pro body B nebo C	%
$\varepsilon_{XB}$	úbytek na průchozí reaktanci pro bod B	%
$\Delta \varepsilon_R$	změna úbytku na průchozím odporu	%
$\varepsilon_u$	chyba napětí transformátoru napětí	%
$\Delta \varepsilon_u$	rozpětí chyb napětí	%
$(\Delta \varepsilon_u)_p$	rozpětí chyb napětí podle zátěže	%
$(\Delta \varepsilon_u)_u$	rozpětí chyb napětí podle napětí	%
$\varepsilon_u^k$	korigovaná chyba napětí	%
$\varepsilon_{uOR}$	složka chyby napětí od proudu naprázdno $I_{20}$	%
$\varepsilon_{uOX}$	složka chyby napětí od proudu naprázdno $I_{20}$	%
$\varepsilon_{uR}$	složka chyby napětí od zatěžovacího proudu $I_2$	%
$\varepsilon_{uX}$	složka chyby napětí od zatěžovacího proudu $I_2$	%
$\emptyset$	magnetický tok	Wb
$v$	korekce	%
$\rho$	měrný odpor	$\Omega \cdot \text{m}$
$\zeta$	činitel plnění magnetického obvodu	-



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Zapojení přístrojových transformátorů do měřených obvodů – [1] str. 73.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3-1 Náhradní schéma napěťového transformátoru - [1] str. 76.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-2 Fázorový diagram pro transformátory napětí - [1] str. 77.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-3 Fázorový diagram pro transformátor napětí pootočený - [1] str. 77 .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-4 Fázorový diagram s úbytkovou částí přepočtený na sekundární závity – [1] str. 78.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-5 Fázorový diagram pro změnu zátěže a změnu napětí <math>U_1</math> - [1] str. 78 .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-6 Základ pro vytvoření komplexního diagramu chyb – [1] str. 79.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-7 Komplexní diagram chyb – [1] str. 79 .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-8 Převod <math>\alpha</math> [%] na <math>\delta_u</math> [min].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-9 Kompletní komplexní diagram chyb – znázornění všech tříd přesnosti.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-1 Prvky náhradního schématu .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-2 Náhradní schéma transformátoru naprázdno .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-3 Náhradní schéma transformátoru naprázdno při zanedbání ztrát v železe.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-4 Závislost chyb na břemeni v komplexním diagramu chyb.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-5 Závislost chyby napětí na břemeni <math>\varepsilon_u = f(P)</math> .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-6 Závislost chyby úhlu na břemeni <math>\delta_u = f(P)</math> .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-7 Závislost chyb na napětí v komplexním diagramu chyb.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-8 Závislost chyby napětí na napětí <math>\varepsilon_u = f(U)</math> .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-9 Závislost chyby úhlu na napětí <math>\delta_u = f(U)</math> .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-10 Závislost chyb na sekundárním účinníku v komplexním diagramu chyb.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-1 Znázornění chyby napětí, chyby úhlu a jejich složek.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-2 Komplexní diagram chyb korigovaného a nekorigovaného transformátoru napětí.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-3 Úbytky průchozí impedance v komplexním diagramu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5-4 Změna složky <math>\varepsilon_R</math> při započítání činného odporu vedení.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-5 Dovolené úbytky <math>\Delta\varepsilon_R</math> v závislosti na zátěži <math>P</math>.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-6 Rozpětí chyb.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-1 Krystalová mřížka s indexy.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-2 Gossova textura .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-3 Kubická textura.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-4 Průřezy čtvercovým a stupňovitým jádrem.....</i>	<i>42</i>



<i>Obr. 6-5 Příklady dělených jader jednofázových a trojfázových .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6-6 Příklady stupňovitých dělených jader.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 7-1 Stanovení tvaru průřezu jádra a průměrů trubkového pouzdra .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-2 Znázornění tvaru průřezu jádra a obou vinutí v programu INVENTOR .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-3 Charakteristické rozměry primárního a sekundárního vinutí .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7-4 Znázornění jádra a obou vinutí v 3D v programu INVENTOR.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7-5 Komplexní diagram chyb pro určení průchozího odporu .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-6 Charakteristické rozměry primárního vinutí rozděleného na dvě sekce .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-7 Rozměry upraveného primárního vinutí na šířku sekundárního vinutí.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-8 Magnetizační charakteristika .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-9 Závislost měrného magnetizačního příkonu na magnetické indukci.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-10 Závislost měrných magnetizačních ztrát na magnetické indukci.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 8-1 Rozměry navrženého průřezu jádra.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 8-2 Znázornění chyb transformátoru napětí v komplexním diagramu chyb: vlevo chyby od výrobce KPB Intra, vpravo chyby volené pro námi navrhovaný transformátor.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 8-3 Znázornění vypočtených chyb transformátoru napětí v komplexním diagramu chyb.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 10-1 Náčrt řezu jádra.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 10-2 Vysunutí řezu jádra.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 10-3 Rotování řezu jádra .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 10-4 Zrcadlení prvku jádra.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 10-5 Rozdělení jádra.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 10-6 Hotový komponent jádra .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 10-7 Primární vinutí .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 10-8 Stahovací pásek .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 10-9 Upínací matice.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 10-10 Sestava stahovacího pásu .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 10-11 Sestava magnetického jádra a obou vinutí.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 10-12 3D model jádra a vinutí - čelní pohled.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 10-13 3D model jádra a vinutí – boční pohled.....</i>	<i>69</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Dovolené chyby měřicích transformátorů napětí - [5]</i> .....	18
<i>Tab. 2-2 Dovolené chyby jisticích transformátorů napětí - [5]</i> .....	18
<i>Tab. 8-1 Chyby měřicího transformátoru napětí s podobným uspořádáním od KPB Intra</i> .....	55
<i>Tab. 8-2 Parametry sekundárního vinutí</i> .....	58
<i>Tab. 8-3 Parametry primárního vinutí</i> .....	59
<i>Tab. 8-4 Výsledné ztrátové a magnetizační proudy v závislosti na napětí <math>U_2</math></i> .....	60
<i>Tab. 8-5 Chyby napětí a úhlu při stavu naprázdno</i> .....	60
<i>Tab. 8-6 Chyby napětí a úhlu při zatížení břemenem</i> .....	61
<i>Tab. 8-7 Celkové chyby napětí a úhlu pro jednotlivé sledované stavy</i> .....	61



## SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK SI

Veličina	Název	Značka
délka	metr	m
hmotnost	kilogram	kg
čas	sekunda	s
elektrický proud	ampér	A

## SEZNAM POUŽITÝCH ODVOZENÝCH JEDNOTEK SI

veličina	Název	Značka	
plocha	čtverečný metr	$\text{m}^2$	
frekvence, kmitočet	hertz	Hz	$\text{s}^{-1}$
hustota		$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
výkon	watt	W	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
zátěž		$\text{V} \cdot \text{A}$	
potenciál, napětí	volt	V	$\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$
elektrický odpor	ohm	$\Omega$	$\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$
elektrická vodivost	siemens	S	$\Omega^{-1}$
magnetická indukce	tesla	T	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$
magnetický tok	weber	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
indukčnost	henry	H	$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1}$
intenzita magnetického pole		$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	